

[Original article]

(2021年3月23日 Accepted)

マルコフ決定過程を用いた輪作と栽培管理

前田 康成¹

1) 北見工業大学・地域未来デザイン工学科

要約：日本農業では収入の増大が必要とされている。農業における収入の最大化については従来から数多く研究されている。従来研究では輪作（栽培作物の選択）と栽培管理は別々に検討されているが、農業収益を最大化するためには統合的に検討する必要がある。本研究では輪作問題と栽培管理問題を統合的に1つの意思決定問題として考える。従来研究同様にマルコフ決定過程を用いてモデル化し、動的計画法によって収益を最大化する。提案方法の有効性をシミュレーションで示す。提案方法による収益は比較対象の収益よりも大きく、提案方法によって作物価格の変動に応じた適応的な意思決定が可能であることを確認した。提案方法の最適解は理論的限界でもあり、理論的限界は他の方法の評価に利用できる。提案方法はスマート農業における意思決定の自動化への貢献が期待される。

キーワード：輪作、栽培管理、収益最大化、マルコフ決定過程、動的計画法

Crop Rotation and Cultivation Management Using Markov Decision Processes

Yasunari MAEDA¹

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

Abstract: Increasing profit is desired in Japanese agriculture. There is many previous research on profit maximization in agriculture. In previous studies crop rotation and cultivation management have been considered independently. But in order to maximize the profit in agriculture, crop rotation problem and cultivation management problem are solved as one problem. In this research crop rotation problem and cultivation management problem are solved as one problem using Markov decision processes. The profit is maximized by dynamic programming. The effectiveness of the proposed method is shown by some simulation examples. The profit of the proposed method is greater than that of the comparison target. In the results of the proposed method the adaptive selection according to the fluctuating crop price was confirmed. The optimal solution of the proposed method is also a theoretical limit. The theoretical limit can be used to evaluate other methods. The proposed method is expected to contribute to the automation of decision making in smart agriculture.

Keywords: crop rotation, cultivation management, profit maximization, Markov decision process, dynamic programming

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

日本農業において収益（または収入）増は重要な問題である。農業収益（または収入）増に関しては従来から数多く検討されており、例えば、栽培作物を選択する輪作問題[1]–[3]、作物の生育を管理する栽培管理問題[4]–[7]に関する従来研究などがある。輪作問題では対象期間の各年の栽培作物を選択するのに対し、栽培管理問題では既に栽培作物が選択済のもとで生育状態に応じた栽培行動（肥料散布、間引きなど）を選択する。両問題ともに目的は収穫量や収益等の最大化である。

一般的に市場の作物価格は変動するが、輪作問題の従来研究[1][2]では価格変動を考慮しないか、または考慮しても検討対象が1年間のみである。輪作では当該年の栽培作物の選択が将来の栽培作物の選択に影響を与えることがある（当該年の選択と将来の選択は独立ではない）ため、検討対象が1年間では不十分である。栽培管理問題の従来研究[4]–[7]も価格変動を考慮していない。また、収益の最大化のために輪作と栽培管理を統合的に検討すべきであるが、従来研究では別々に検討してきた。例えば、輪作問題の従来研究[3]では作物の価格変動を考慮したもとで期待収益を最大化する輪作方法が検討されている。しかし、栽培管理の最適化を考慮していないため、平均的な収穫量（または収益）等の既存データに基づく期待収益の最大化であり、真に最大化はできない。

そこで、本研究では年単位の価格変動を考慮し、数年間の計画的な輪作と栽培管理を統合的にモデル化する。確率モデルとして輪作問題や栽培管理問題の従来研究でも利用されているマルコフ決定過程[8]を採用する。輪作と栽培管理を統合的にモデル化することにより、各作物の最適な栽培管理による収穫量（または収益）に基づく最適な輪作（栽培作物の選択）を実施できる。提案方法では動的計画法[8]により総収益の期待値を最大化する。提案方法の有効性をシミュレーションで確認する。

本研究の提案方法は最適解として、最適な栽培行動及び栽培作物とともに理論的限界である総収益の期待値の最大値も算出する。理論的限界値は他の方法（近似解や経験則等）の評価にも利用できる。また、本研究で対象とする栽培管理及び輪作に関する検討は、栽培行動や栽培作物の自動選択に関連する。よって、本研究や今後の拡張研究はスマート農業における意思決定の自動化への貢献が期待できる。

2. 準備

本研究で使用する記号などを説明する。本研究では、作物の価格が変動する場合の輪作と栽培管理を対象とするが、比較対象として価格固定の場合も考える。価格固定の場合の方が簡便のため、本章では価格固定の場合の記号を説明し、価格変動の場合は4章に示す。

$a_{1,i} \in A_1$ 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、同じ場所で $n(a_{1,i})$ 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。 $a_{2,i} \in A_2$ 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。 $b(a_{2,i})$ 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。

$\Pr(s_j | a_{1,i})$ は作物 $a_{1,i}$ を植えた際の初期の生育状態が

s_j である初期生育状態確率を示す。 $\Pr(s_l | s_j, a_{2,k}, a_{1,i})$ は作物 $a_{1,i}$ を栽培中の生育状態 s_j 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_l になる生育状態遷移確率を示す。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_l 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、出荷によっての売上 $p(a_{1,i})h(s_j, a_{1,i})$ が発生する。

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、 $T(T'+1)$ 回の意思決定を伴う問題になる。紙数の都合から詳細は割愛するが、各年の栽培管理の T' 回の栽培行動の選択は次の年の最初の状態(次の年の輪作で栽培作物を選択する状態)とは独立である。また、各年の栽培管理は共通である。よって、 $T(T'+1)$ 回の意思決定を伴う問題を、 T' 回の栽培行動選択を伴う栽培管理問題と T 回の栽培作物選択を伴う輪作問題に分割しても T 年間の期待収益を最大化できる。本稿では以後、栽培管理問題と輪作問題に分けて説明する。ただし、輪作問題の中で栽培管理問題の最適解を利用する。よって、効率的な計算のために問題を分割するが、輪作と栽培管理を統合的に検討する方針に変更はない。輪作問題の中で栽培管理問題の最適解を利用して統合的な最適解を算出する点が、輪作問題と栽培管理問題を別々に検討している従来研究との違いである。

本研究で採用している確率モデルのマルコフ決定過程は状態、行動、遷移確率、利得で構成される。例えば栽培管理問題の生育状態、栽培行動、生育状態遷移確率がマルコフ決定過程の状態、行動、遷移確率に相当し、作物価格と収穫量による売上 $p(a_{1,i})h(s_j, a_{1,i})$ と栽培行動コストが利得に相当する。

3. 価格固定の場合の輪作と栽培管理 (提案方法の比較対象)

本章では本研究の提案方法の比較対象である、価格固定の場合の輪作と栽培管理について説明する。

3.1 価格固定の場合の栽培管理

最初に T' 期間の栽培管理問題について考える。 $X_t' \in S$ は t 期の生育状態を示す変数である。作物 $a_{1,i}$ の初期の生育状態が X_1' のもとでの期待収益を最大化するために、動

的計画法で T' 期から1期まで遡りながら処理する。

T' 期の栽培行動の選択を示す。

$$\begin{aligned} v_1(X_{T'}', a_{1,i}, T') &= \max_{Y_{T'}' \in A_2} \sum_{X_{T'+1}' \in S} \Pr(X_{T'+1}' | X_{T'}', Y_{T'}', a_{1,i}) \\ &\quad p(a_{1,i}) h(X_{T'+1}', a_{1,i}) - b(Y_{T'}'), \end{aligned} \quad (2)$$

ただし、 $v_1(X_{T'}', a_{1,i}, T')$ は T' 期の期待収益の最大値で、期待収益は栽培作物 $a_{1,i}$ の売上の期待値と T' 期の栽培行動コストの差分に相当する。式(2)の右辺を最大にする栽培行動 $Y_{T'}'$ が最適な栽培行動である。

t 期($1 \leq t < T'$)の栽培行動の選択を示す。

$$\begin{aligned} v_1(X_t', a_{1,i}, t) &= \max_{Y_t' \in A_2} \sum_{X_{t+1}' \in S} \Pr(X_{t+1}' | X_t', Y_t', a_{1,i}) \\ &\quad v_1(X_{t+1}', a_{1,i}, t+1) - b(Y_t'), \end{aligned} \quad (3)$$

ただし、 $v_1(X_t', a_{1,i}, t)$ は t 期以降の期待収益の最大値である。式(3)の右辺を最大にする栽培行動 Y_t' が最適な栽培行動である。式(2)、式(3)により、初期生育状態が X_1' の場合の作物 $a_{1,i}$ の期待収益の最大値 $v_1(X_1', a_{1,i}, 1)$ が算出できる。これを全作物、全生育状態について算出する。これらの値は各年で同じ(共通)である。

3.2 価格固定の場合の輪作

次に3.1節の栽培管理で算出済の各作物の期待収益の最大値 v_1 を利用する輪作問題を考える。これは、 T 年間(T 回)の栽培作物の選択問題である。栽培管理の v_1 が輪作でのマルコフ決定過程の利得に相当する。

X_t'' は t 年目の状態を示す変数である。

$$X_t'' = (Y_{t-N}'' \dots, Y_{t-2}'' \dots, Y_{t-1}''), \quad (4)$$

ただし、 Y_i'' は i 年目の栽培作物を示す変数である。 T 年間の期待収益を最大化する T 年間の栽培作物を選択するために、栽培管理と同様に動的計画法で最後の T 年目から1年目まで遡りながら処理する。

T 年目の栽培作物の選択を示す。

$$\begin{aligned} v_2(X_T'', T) &= \max_{Y_T'' \in A_1(X_T'')} \sum_{S_i \in S} \Pr(S_i | Y_T'') v_1(S_i, Y_T'', 1), \end{aligned} \quad (5)$$

ただし、

$$A_1(X''_T) = \{a_{1,j} \mid \forall k, 1 \leq k \leq N, \\ c(a_{1,j}) \neq c(Y''_{T-k}) \vee n(Y''_{T-k}) < k\}, \quad (6)$$

$A_1(X''_T)$ は栽培作物の履歴の輪作年限を考慮した状態 X''_T で選択可能な作物集合である。 $v_2(X''_T, T)$ は T 年目の期待収益の最大値である。式(5)の右辺を最大にする作物 Y''_T が最適な作物である。

t 年目 ($1 \leq t < T$) の栽培作物の選択を示す。

$$v_2(X''_t, t) = \max_{Y''_t \in A_1(X''_t)} \sum_{s_i \in S} \Pr(s_i | Y''_t) \\ v_1(s_i, Y''_t, 1) + v_2(X''_{t+1}, t+1), \quad (7)$$

ただし、 $v_2(X''_t, t)$ は t 年目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作物 Y''_t が最適な作物である。なお、本研究では簡便のため全作物で種子などの仕入コストが同一（あるいは0（万円））と仮定して省略しているが、本研究を拡張して仕入コストを導入する場合には式(5)及び式(7)の右辺から仕入コストを引くことになる。

4. 価格変動の場合の輪作と栽培管理 (提案方法)

本研究の提案方法である、相場状態に応じて価格が変動する場合の輪作と栽培管理について説明する。

4.1 価格変動の場合の準備

相場状態に関して追加で記号等を説明する。 $m_i \in M$ は作物価格の i 番目の相場状態を示し、 $M = \{m_1, m_2, \dots, m_{|M|}\}$ は相場状態集合である。相場状態は年単位で、マルコフ連鎖[8]の遷移確率 $\Pr(m_j | m_i)$ に従って遷移する。作物 $a_{1,i}$ の相場状態 m_j での価格を $p(m_j, a_{1,i})$ (万円/トン) とする。

4.2 価格変動の場合の栽培管理

T' 期間の栽培管理問題について考える。 $X'_t \in S$ は t 期の生育状態を示す変数である。作物 $a_{1,i}$ の初期の生育状態が X'_1 、作物 $a_{1,i}$ の前年の相場状態が $W_{pre} \in M$ のもとでの期待収益を最大化するために、価格固定の場合と同様に動的計画法で T' 期から 1 期まで遡りながら処理する。

T' 期の栽培行動の選択を示す。

$$v_1(X'_T, W_{pre}, a_{1,i}, T') = \max_{Y'_{T'+1} \in A_2} \sum_{X'_{T'+1} \in S}$$

$$\Pr(X'_{T'+1} | X'_T, Y'_T, a_{1,i}) \sum_{W_{next} \in M} \Pr(W_{next} | W_{pre}) \\ p(W_{next}, a_{1,i}) h(X'_{T'+1}, a_{1,i}) - b(Y'_T), \quad (8)$$

ただし、 W_{next} は作物 $a_{1,i}$ の当該年の相場状態である。 $v_1(X'_T, W_{pre}, a_{1,i}, T')$ は T' 期の期待収益の最大値で、期待収益は栽培作物 $a_{1,i}$ の売上の期待値と T' 期の栽培行動コストの差分に相当する。式(8)の右辺を最大にする栽培行動 Y'_T が最適な栽培行動である。

t 期 ($1 \leq t < T'$) の栽培行動の選択を示す。

$$v_1(X'_t, W_{pre}, a_{1,i}, t) = \max_{Y'_t \in A_2} \sum_{X'_{t+1} \in S} \\ \Pr(X'_{t+1} | X'_t, Y'_t, a_{1,i}) \\ v_1(X'_{t+1}, W_{pre}, a_{1,i}, t+1) - b(Y'_t), \quad (9)$$

ただし、 $v_1(X'_t, W_{pre}, a_{1,i}, t)$ は t 期以降の期待収益の最大値である。式(9)の右辺を最大にする栽培行動 Y'_t が最適な栽培行動である。式(8)、式(9)により、前年の相場状態が W_{pre} 、初期生育状態が X'_1 の場合の作物 $a_{1,i}$ の期待収益の最大値 $v_1(X'_1, W_{pre}, a_{1,i}, 1)$ が算出できる。これを全作物、全生育状態、全相場状態について算出する。これらの値は各年で同じ（共通）である。

4.3 価格変動の場合の輪作

次に 4.2 節の栽培管理で算出済の各作物の期待収益の最大値 v_1 を利用する輪作問題を考える。これは、 T 年間 (T 回) の栽培作物の選択問題である。

X''_t は t 年目の状態を示す変数である。

$$X''_t = (Y''_{t-N}, \dots, Y''_{t-1}, W_{t-1}), \quad (10)$$

$$W_{t-1} = (W_{t-1,1}, \dots, W_{t-1,|A_1|}), \quad (11)$$

ただし、 Y''_i は i 年目の栽培作物を示す変数である。 W_{t-1} は $t-1$ 年目の作物の相場状態情報で、 $W_{t-1,i} \in M$ は $t-1$ 年目の作物 $a_{1,i}$ の相場状態である。 T 年間の期待収益を最大化する T 年間の栽培作物を選択するために、価格固定の場合と同様に動的計画法で T 年目から 1 年目まで遡りながら処理する。

T 年目の栽培作物の選択を示す。

$$v_2(X_T'', T) = \max_{Y_T'' \in A_1(X_T'')} \sum_{s_i \in S} \Pr(s_i | Y_T'')$$

$$\Pr(s_i | Y_T'') v_1(s_i, W_{t-1,I(Y_T'')}, Y_T'', 1), \quad (12)$$

ただし、 $I(Y_T'')$ は作物 Y_T'' の番号である。 $A_1(X_T'')$ は式(6)同様に状態 X_T'' で選択可能な作物集合である。 $v_2(X_T'', T)$ は T 年目の期待収益の最大値である。式(12)の右辺を最大にする作物 Y_T'' が最適な作物である。

t 年目 ($1 \leq t < T$) の栽培作物の選択を示す。

$$v_2(X_t'', t) = \max_{Y_t'' \in A_1(X_t'')} \sum_{s_i \in S} \Pr(s_i | Y_t'')$$

$$v_1(s_i, W_{t-1,I(Y_t'')}, Y_t'', 1) +$$

$$\sum_{W_t \in M^{|A_1|}} \prod_{i=1}^{|A_1|} \Pr(W_{t,i} | W_{t-1,i}) v_2(X_{t+1}'', t+1), \quad (13)$$

ただし、 $v_2(X_t'', t)$ は t 年目以降の期待収益の最大値である。式(13)の右辺を最大にする作物 Y_t'' が最適な作物である。なお、本研究では簡便のため全作物で種子などの仕入コストが同一 (あるいは0 (万円)) と仮定して省略しているが、本研究を拡張して仕入コストを導入する場合には式(12)及び式(13)の右辺から仕入コストを引くことになる。

5. 提案方法と価格固定の場合との比較

提案方法の有効性を検証するために、価格固定の場合との比較結果を示す。

5.1 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。より厳密な検証のため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 $|A_1| = 6$ 、作物の科の数 $|C| = 3$ 、生育状態数 $|S| = 3$ 、相場状態数 $|M| = 2$ 、年数 (栽培作物選択回数) $T = 5$ 、期数 (栽培行動の選択回数) $T' = 5$ 、栽培行動数 $|A_2| = 3$ とする。

作物 $a_{1,i}$ の輪作年限 $n(a_{1,i})$ 、科 $c(a_{1,i})$ を表1、栽培行動 $a_{2,i}$ のコスト $b(a_{2,i})$ を表2に示す。

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3、初期生育状態確率 $\Pr(s_j | a_{1,i})$ を等確率とし、生育状態遷移確率 $\Pr(s_l | s_j, a_{2,k}, a_{1,i})$ を表4に示す。ただし、簡便のため全作物で同じ収穫量、同じ確率とした。相場状態の遷移確率は同状態への遷移確率 $\Pr(m_i | m_i)$ が

$$\Pr(m_1 | m_1) = \Pr(m_2 | m_2)$$

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

| | $n(a_{1,i})$ | $c(a_{1,i})$ |
|-----------|--------------|--------------|
| $a_{1,1}$ | 1年 | c_1 |
| $a_{1,2}$ | 2年 | c_1 |
| $a_{1,3}$ | 1年 | c_2 |
| $a_{1,4}$ | 2年 | c_2 |
| $a_{1,5}$ | 1年 | c_3 |
| $a_{1,6}$ | 2年 | c_3 |

表2. 栽培行動 $a_{2,i}$ のコスト $b(a_{2,i})$

| | $a_{2,1}$ | $a_{2,2}$ | $a_{2,3}$ |
|--------------|-----------|-----------|-----------|
| $b(a_{2,i})$ | 100万円 | 50万円 | 10万円 |

表3. 生育状態 s_i での作物 $a_{1,j}$ の収穫量 $h(s_i, a_{1,j})$

| | s_1 | s_2 | s_3 |
|-------------------|-------|-------|-------|
| $h(s_i, a_{1,j})$ | 100トン | 70トン | 40トン |

表4. 生育状態遷移確率 $\Pr(s_l | s_j, a_{2,k}, a_{1,i})$

| | | $l = 1$ | $l = 2$ | $l = 3$ |
|---------|---------|---------|---------|---------|
| $k = 1$ | $j = 1$ | 0.97 | 0.02 | 0.01 |
| | $j = 2$ | 0.6 | 0.35 | 0.05 |
| | $j = 3$ | 0.2 | 0.6 | 0.2 |
| $k = 2$ | $j = 1$ | 0.8 | 0.15 | 0.05 |
| | $j = 2$ | 0.25 | 0.55 | 0.2 |
| | $j = 3$ | 0.1 | 0.4 | 0.5 |
| $k = 3$ | $j = 1$ | 0.6 | 0.3 | 0.1 |
| | $j = 2$ | 0.05 | 0.55 | 0.4 |
| | $j = 3$ | 0.01 | 0.09 | 0.9 |

作物 $a_{1,i}$ の相場状態 m_j における作物価格 $p(m_j, a_{1,i})$ と価格固定の場合の作物価格 $p(a_{1,i})$ について2パターン用意した。表5がパターン1、表6がパターン2である。

なお、固定の作物価格 $p(a_{1,i})$ は価格変動の場合の相場状態のマルコフ連鎖の定常確率[8]で価格変動の場合の価格 $p(m_j, a_{1,i})$ の期待値を算出して設定した。定常確率は状態遷移を無限回繰返した場合の各状態での平均的な滞在確率である。今回の設定 $\Pr(m_1 | m_1) =$

$$\Pr(m_1 | m_1) = \Pr(m_2 | m_2)$$

$\Pr(m_2|m_2)$ のもとでは、定常確率は状態 m_1 , m_2 とともに 0.5 である。

表5. 作物 $a_{1,i}$ の変動価格 $p(m_j, a_{1,i})$ (万円／トン) と
固定価格 $p(a_{1,i})$ (万円／トン) (パターン1)

| | $p(m_1, a_{1,i})$ | $p(m_2, a_{1,i})$ | $p(a_{1,i})$ |
|-----------|-------------------|-------------------|--------------|
| $a_{1,1}$ | 12 | 8 | 10 |
| $a_{1,2}$ | 13 | 9 | 11 |
| $a_{1,3}$ | 13 | 9 | 11 |
| $a_{1,4}$ | 15 | 11 | 13 |
| $a_{1,5}$ | 11 | 7 | 9 |
| $a_{1,6}$ | 13 | 9 | 11 |

表6. 作物 $a_{1,i}$ の変動価格 $p(m_j, a_{1,i})$ (万円／トン) と
固定価格 $p(a_{1,i})$ (万円／トン) (パターン2)

| | $p(m_1, a_{1,i})$ | $p(m_2, a_{1,i})$ | $p(a_{1,i})$ |
|-----------|-------------------|-------------------|--------------|
| $a_{1,1}$ | 13 | 9 | 11 |
| $a_{1,2}$ | 12 | 8 | 10 |
| $a_{1,3}$ | 15 | 11 | 13 |
| $a_{1,4}$ | 13 | 9 | 11 |
| $a_{1,5}$ | 13 | 9 | 11 |
| $a_{1,6}$ | 11 | 7 | 9 |

パターン1は、すべての科において輪作年限が2年の作物 ($a_{1,2}$, $a_{1,4}$, $a_{1,6}$) の方が1年の作物 ($a_{1,1}$, $a_{1,3}$, $a_{1,5}$) よりも価格が大きいため、仮に価格が固定であれば基本的には輪作年限が2年の作物でのローテーションが良さそうに思われるパターンである。他方、パターン2は、すべての科において輪作年限が1年の作物の方が2年の作物よりも価格が大きいため、仮に価格が固定であれば基本的には輪作年限が1年の作物でのローテーションが良さそうに思われるパターンである。

5.2 結果

比較結果を図1 (パターン1) 及び図2 (パターン2) に示す。図1及び図2の収益 (変) は価格変動の場合の提案

方法による10万回のシミュレーションでの $T = 5$ 年間の平均収益、収益 (固) は比較対象である価格固定の場合の平均収益である。ただし、収益 (固) では価格固定の場合の方法で算出した栽培作物、栽培行動について価格変動の場合のシミュレーション環境でシミュレーションしている。今回は比較対象の収益 (固) のシミュレーションとともに提案方法のシミュレーションである収益 (変) も実施したが、収益 (変) の結果は提案方法で算出する期待収益の最大値にほぼ一致する。収益 (変) の結果と提案方法で算出する期待収益の最大値の差は図では確認できない程度の差のため、図1及び図2には収益 (変) の結果のみ示している。輪作の初期状態に相当する過去2年間の栽培作物の履歴は等確率で発生させた。図の中の遷移確率 $\Pr(m_i|m_i)$ は相場状態の同状態への遷移確率 $\Pr(m_1|m_1) = \Pr(m_2|m_2)$ の値である。

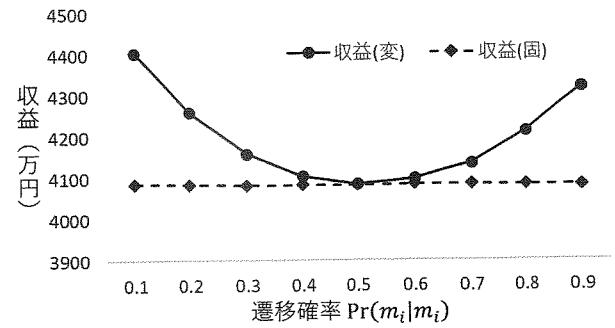


図1. 収益 (万円／5年) の比較 (パターン1)

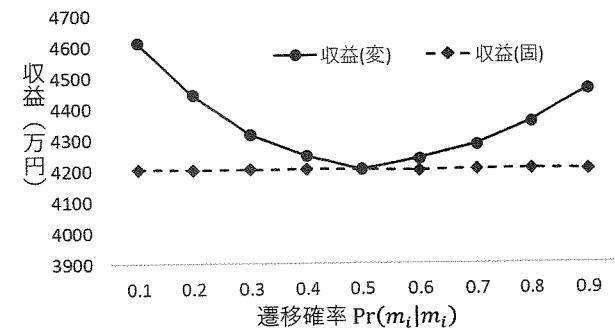


図2. 収益 (万円／5年) の比較 (パターン2)

図1及び図2では、相場状態の同状態への遷移確率が0.1または0.9に近いほど価格変動を考慮した提案方法での平均収益が大きい。これは、動的計画法による再帰処理で次の年以降の期待値を算出する際に遷移確率が0.1または0.9に近いほど高い確率で次の年の相場状態を正し

く予測できるためだと考えられる。

図1及び図2のシミュレーション例より、価格変動を考慮する提案方法によって、価格変動を考慮しない場合よりもより大きな農業収益が期待できることがわかった。

次に価格変動を考慮した提案方法と価格固定の場合の栽培管理(栽培行動の選択)と輪作(栽培作物の選択)の具体的な差について説明する。栽培管理について表7に示す。

表7. 栽培管理での提案方法と価格固定の場合の栽培行動選択の差 (パターン1, $\Pr(m_i|m_i) = 0.1$)

| | 固1 | 変1 | 変2 | 固2 | 変3 | 変4 |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| t | 3 | 3 | 3 | 5 | 5 | 5 |
| X'_t | s_3 | s_3 | s_3 | s_1 | s_1 | s_1 |
| W_{pre} | — | m_1 | m_2 | — | m_1 | m_2 |
| $a_{1,i}$ | $a_{1,1}$ | $a_{1,1}$ | $a_{1,1}$ | $a_{1,5}$ | $a_{1,5}$ | $a_{1,5}$ |
| Y'_t | $a_{2,3}$ | $a_{2,3}$ | $a_{2,2}$ | $a_{2,1}$ | $a_{2,2}$ | $a_{2,1}$ |

表7はパターン1の遷移確率 $\Pr(m_i|m_i) = 0.1$ の場合である。価格固定の場合が固1と固2、提案方法が変1～変4である。固1、変1、変2が作物 $a_{1,1}$ の栽培管理で3期に生育状態が s_3 の場合である。価格固定の固1と当該年の相場状態が低価格の m_2 になる可能性が高い提案方法の変1ではコストが最小の栽培行動 $a_{2,3}$ を選択しているのに対して、当該年の相場状態が高価格の m_1 になる可能性が高い提案方法の変2ではコストが中程度の栽培行動 $a_{2,2}$ を選択している。固2、変3、変4が作物 $a_{1,5}$ の栽培管理で5期に生育状態が s_1 の場合である。価格固定の固2と当該年の相場状態が高価格の m_1 になる可能性が高い提案方法の変4ではコストが最大の栽培行動 $a_{2,1}$ を選択しているのに対して、当該年の相場状態が低価格の m_2 になる可能性が高い提案方法の変3ではコストが中程度の栽培行動 $a_{2,2}$ を選択している。

なお、パターン1とパターン2の設定の違いは表5及び表6の作物価格なので、各作物に関する栽培管理では特徴的な違いはない。

次に輪作(栽培作物の選択)の具体的な差について紹介する。価格固定のパターン1については表8に示す輪作年限が2年の作物 $a_{1,2}$ 、作物 $a_{1,4}$ 、作物 $a_{1,6}$ のローテーション、パターン2については表9に示す輪作年限が1年の作物 $a_{1,1}$ 、作物 $a_{1,3}$ のローテーションがほとんどである。

表8. 輪作での価格固定の場合の作物選択例
(パターン1)

| t | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Y''_{t-2} | $a_{1,2}$ | $a_{1,6}$ | $a_{1,4}$ | $a_{1,2}$ | $a_{1,6}$ |
| Y''_{t-1} | $a_{1,6}$ | $a_{1,4}$ | $a_{1,2}$ | $a_{1,6}$ | $a_{1,4}$ |
| Y''_t | $a_{1,4}$ | $a_{1,2}$ | $a_{1,6}$ | $a_{1,4}$ | $a_{1,2}$ |

表9. 輪作での価格固定の場合の作物選択例
(パターン2)

| t | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Y''_{t-2} | $a_{1,2}$ | $a_{1,6}$ | $a_{1,3}$ | $a_{1,1}$ | $a_{1,3}$ |
| Y''_{t-1} | $a_{1,6}$ | $a_{1,3}$ | $a_{1,1}$ | $a_{1,3}$ | $a_{1,1}$ |
| Y''_t | $a_{1,3}$ | $a_{1,1}$ | $a_{1,3}$ | $a_{1,1}$ | $a_{1,3}$ |

表10. 提案方法のパターン1での選択作物
($\Pr(m_i|m_i) = 0.1$)

| | 例1 | 例2 | 例3 | 例4 |
|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| t | 1 | 1 | 3 | 3 |
| Y_{t-2} | $a_{1,2}$ | $a_{1,2}$ | $a_{1,4}$ | $a_{1,4}$ |
| Y_{t-1} | $a_{2,6}$ | $a_{2,6}$ | $a_{1,2}$ | $a_{1,2}$ |
| $W_{t-1,1}$ | m_1 | m_1 | m_2 | m_2 |
| $W_{t-1,2}$ | m_1 | m_1 | m_2 | m_2 |
| $W_{t-1,3}$ | m_1 | m_2 | m_2 | m_2 |
| $W_{t-1,4}$ | m_1 | m_1 | m_2 | m_2 |
| $W_{t-1,5}$ | m_1 | m_1 | m_2 | m_2 |
| $W_{t-1,6}$ | m_1 | m_1 | m_2 | m_1 |
| Y_t | $a_{1,4}$ | $a_{1,3}$ | $a_{1,6}$ | $a_{1,5}$ |

表11. 提案方法のパターン2での選択作物
($\Pr(m_i|m_i) = 0.1$)

| | 例1 | 例2 | 例3 | 例4 |
|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| t | 1 | 1 | 2 | 2 |
| Y_{t-2} | $a_{1,2}$ | $a_{1,2}$ | $a_{1,6}$ | $a_{1,6}$ |
| Y_{t-1} | $a_{2,6}$ | $a_{2,6}$ | $a_{1,3}$ | $a_{1,3}$ |
| $W_{t-1,1}$ | m_2 | m_2 | m_2 | m_1 |
| $W_{t-1,2}$ | m_2 | m_2 | m_2 | m_2 |
| $W_{t-1,3}$ | m_2 | m_1 | m_2 | m_2 |
| $W_{t-1,4}$ | m_2 | m_2 | m_2 | m_2 |
| $W_{t-1,5}$ | m_2 | m_2 | m_2 | m_2 |
| $W_{t-1,6}$ | m_2 | m_2 | m_2 | m_2 |
| Y_t | $a_{1,3}$ | $a_{1,4}$ | $a_{1,1}$ | $a_{1,2}$ |

他方、提案方法では前年の相場状態に対して適応的に作物を選択することにより、価格固定の場合のローテーションと一致する場合と一致しない場合がある。表10のパターン1の例1と例3では価格固定の場合のローテーションと一致しているが、例2と例4では適応的に価格固定の場合のローテーションと異なる作物を選択している。表11のパターン2でも同様に例1と例3では価格固定の場合のローテーションと一致しているが、例2と例4では適応的に価格固定の場合のローテーションと異なる作物を選択している。

以上より、提案方法では栽培管理と輪作（栽培作物の選択）の統合モデルに基づいて、前年の相場状態に応じて適応的に栽培管理と栽培作物の選択を実施することによって、価格固定の場合よりも大きな農業収益を期待できることができた。ただし、上記のシミュレーションは一例に過ぎない。各種設定が異なれば、例えば、栽培作物の選択においてどの作物を選択しても同程度の収益になる場合もある。つまり、提案方法によって期待収益を最大化するという意味で最適な解（最適な栽培行動と栽培作物）を算出できるが、最適解以外の期待収益との差の大きさは設定（あるいは実データ）に依存する。

本研究は輪作のみを対象に価格変動を考慮した従来研究[3]を、対象に栽培管理も追加して統合的に検討するように拡張した研究と解釈できる。図1及び図2のシミュレーション結果と表8～表11の輪作結果の特徴は、輪作のみの従来研究[3]と同様である。

栽培管理のみに注目すると、本研究は作物価格が固定の場合の栽培管理問題の従来研究[4]～[7]を作物価格が変動するように拡張した研究とも解釈できる。図1及び図2のシミュレーション結果と表7より、栽培管理のみを検討する場合でも、前年の相場状態に応じて適応的に栽培管理を実施することによって、価格固定の場合よりも大きな農業収益を期待できることができる。

6. 考察と今後の課題

6.1 考察

本研究では、作物価格の相場状態が変動するもとで栽培管理（栽培行動の選択）と輪作（栽培作物の選択）を統合的に検討し、総収益の期待値を最大化する提案方法を提案した。提案方法では、最適解として最適な栽培作物、栽培行動とともに期待収益の最大値も算出する。最適な栽培作物、栽培行動は実際の栽培作物の選択、栽培管理に適用できるが、期待収益の最大値は他にも利用可

能である。

期待収益の最大値は本研究の問題設定のもとで得ることができる農業収益の理論的限界値である。よって、本研究の問題設定に対する何らかの近似解法、経験則等による予測収益（シミュレーション結果など）と本研究の提案方法による期待収益の最大値を比較することで、当該近似解法や経験則等の理論的限界に対する評価が可能である。

5章で紹介した比較結果についても、作物価格が固定の場合の方法（本研究の比較対象）を、価格が変動する本研究の問題設定に適用する際の理論的限界に対する評価結果とも解釈できる。比較（評価）結果より、相場状態が同じ状態に遷移する確率 $\Pr(m_i|m_i)$ が0.5付近では、価格固定の場合の方法でも理論的限界を達成できることが確認できる。

本研究は基礎研究の初期段階であり、より現実に近い問題設定等の今後の拡張研究が想定される。拡張研究において本研究同様に最適な提案方法が導出できれば、実際の作物選択や栽培管理への適用以外に、他の方法（近似解法や経験則等）の評価も可能である。よって、本研究やその拡張研究はスマート農業における意思決定の自動化への貢献が期待される。

6.2 今後の課題

本研究では、モデル中の各種確率の値（各種確率分布の真のパラメータ）が既知であると仮定した。しかし、現実にはこれらは未知である。よって、より現実に近い問題設定として未知の場合への拡張研究が必要である。本研究では輪作と栽培管理の統合的な確率モデルとしてマルコフ決定過程を採用しているが、未知パラメータを伴うマルコフ決定過程については従来からさまざまな検討が行われている。例えば、従来研究[9]はベイズ統計学の視点からベイズ最適な解の算出方法を提案している。本研究の拡張研究にもベイズ統計学の視点に基づくアプローチが適用可能だと考える。

従来研究[9]では、マルコフ決定過程の期待利得（本研究の期待収益に相当）を最大化したい期間内で未知パラメータに関する学習と期待利得の最大化を両立している。他方、従来研究[10]では期待利得を最大化したい期間の前に学習に専念する学習期間を設けた問題設定のもとで、ベイズ最適な解の算出方法を提案している。従来研究[10]と同様の問題設定を農業に適用すると、学習期間の輪作や栽培管理は農業試験場で行われる試験栽培に相当する。農業試験場では多種多様な試験栽培が行

われて、多くのデータが蓄積されている。しかし、試験栽培を実施するための資源、時間は限られている。よって、従来研究[10]を農業に適用することによるベイズ最適な試験栽培は、効率的な試験栽培を実現するという意味で興味深い課題である。

また、今回は連作に該当する作物は選択肢から除外したが、相場状態次第では連作障害による収量減のリスクを考慮しても当該作物を選択すべき状況が発生する可能性もある。よって、より現実に近い問題設定として連作障害の可能性のある作物の選択肢への追加も重要である。従来研究[2]のように確定的に連作障害として収量減をモデル化することもできるが、確率的に連作障害による収量減が発生するようなモデル化も可能である。

7.まとめ

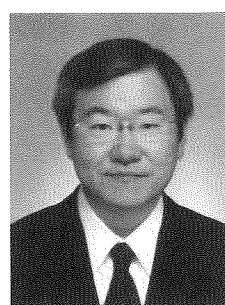
農業収益の最大化のためには、輪作(栽培作物の選択)と栽培管理を統合的に検討すべきであるが、従来研究では別々に検討されてきた。また、従来研究では作物価格の変動が十分に考慮されていない場合が多い。そこで、本研究では価格変動を考慮して輪作と栽培管理を統合的にモデル化し、期待収益の最大化を提案した。

シミュレーションによって提案方法と価格固定の場合を比較し、次の年の相場状態を高い精度で予測可能な設定の場合に提案方法の方がより大きな収益を獲得できる傾向が確認できた。また、提案方法では前年の相場状態に応じて適応的に栽培行動及び栽培作物を選択できることも確認した。

本研究は基礎検討であり、シミュレーションの各種設定は部分的に実データも参考にしたが、基本的に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。今後は、6.2節で今後の課題として挙げた拡張研究など、より現実に近い問題設定を検討する。

参考文献

- [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 Management, Vol.8, No.4, pp.169-173, 2014.
- [3] 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・ファジイ・システム学会誌, Vol. 22, No. 2, pp. 21–32, 2020.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 神成淳司：農業ICTの最新動向、情報処理, Vol. 58, No. 9, pp. 818–822, 2017.
- [7] 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. XX-XX, 2021. 【掲載待ち】
- [8] 森村英典, 高橋幸雄:マルコフ解析, 日科技連, 東京, 1979.
- [9] J.J. Martin : Bayesian Decision Problems and Markov Chains, John Wiley & Sons, 1967.
- [10] 前田康成, 浮田善文, 松嶋敏泰, 平澤茂一：学習期間と制御期間に分割された強化学習における最適アルゴリズムの提案、情報処理学会論文誌, Vol. 39, No. 4, pp. 1116–1126, 1998.



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。