

センサを伴うスマート農業における統合管理

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：日本農業では収益（または収入）の増大が必要とされており，農業収益の最大化については数多くの従来研究がある．従来研究では，輪作（栽培作物の選択）と栽培管理（栽培行動の選択）が1つの統合管理問題として検討され，栽培作物の生育状態が既知という条件のもとで収益が最大化されている．しかし，近年のセンサを伴うスマート農業では真の生育状態は未知である．そこで，本研究ではセンサを伴うスマート農業における新たな統合管理方法を提案する．提案方法では，マルコフ決定過程を利用して生育状態未知の条件のもとで収益を最大化する．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，作物価格の変動に応じた適応的な意思決定をシミュレーション結果で確認した．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．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：統合管理，センサ，輪作，栽培管理，マルコフ決定過程

Integrated Management in Smart Agriculture with Sensors

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 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 growth states are known. But in smart agriculture with sensors the true growth states are unknown. In this research a new integrated management method for smart agriculture with sensors is proposed. The proposed method maximizes the profit under the condition that the growth states are unknown using Markov decision processes. 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 proposed method is expected to contribute to the automation of decision making in smart agriculture. This research is a basic research, and future extended research is required.

Keywords: integrated management, sensor, crop rotation, cultivation management, Markov decision process

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

日本農業では、収益（または収入）をいかに高めるかが重要な課題の1つになっている。従来から、対象期間の各年の栽培作物を選択する輪作問題、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）を選択する栽培管理問題において収穫量や収益等の最大化が検討されている[1]-[8]。

従来研究[1]-[3]では主に輪作問題、従来研究[4]-[7]では主に栽培管理問題における収益等を最大化しているが、本来は輪作問題と栽培管理問題を単独で検討するのではなく統合的に検討する必要がある。例えば、輪作問題のみを検討する従来研究[1]-[3]では、各候補の作物に関する収益の値として過去の平均収益等が利用され、栽培管理部分について最適化されていない。他方、栽培管理問題のみを検討する従来研究[4]-[7]では、栽培作物は選択済の問題設定で検討しており、輪作（栽培作物の選択）に関して最適化されていない。また、一般的に作物の市場価格（農家が市場に売る価格）は変動するが、従来研究[1]-[7]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。

従来研究[8]では、市場価格の変動を考慮したもとで、輪作問題と栽培管理問題を1つの統合管理の意思決定問題としてマルコフ決定過程[9]を用いてモデル化し、期待収益を最大化している。

上記では、農業における期待収益の最大化に関して述べたが、近年、農業分野ではスマート農業[6]に関する検討も多い。スマート農業は農林水産省が提唱したもので、「熟練の農業従事者の暗黙知に基づく高品質／高収入の農業」と同レベルの農業をICT（情報通信技術）の利用によって経験の浅い農業従事者にも可能にすることを目標とした農業である。熟練の農業従事者と同レベルの農業を経験の浅い農業従事者にも可能にすることのメリットは、農業従事者全体の高収益化と、高収益化による後継者不足の解消である。

スマート農業では、農業における作業や意思決定の一部をICTの利用によって自動化／半自動化することが多い。上記の収穫量や収益等の最大化に関する従来研究[1]-[8]の中にはスマート農業という言葉が生まれる以前の研究もあるが、すべての研究で農業における意思決定の自動化／半自動化を検討しており、スマート農業そのものあるいはスマート農業に関連する研究でもある。

輪作と栽培管理の統合管理における期待収益の最大化に関する従来研究[8]では、栽培作物の生育状態が観測可能（既知）と仮定している。生育状態は作物の発芽

期、収穫期などの各期における作物の生育状況の良し悪しを示す。生育状態の判定（生育状況の良し悪しの評価）は、畑で農業従事者が目視などで観察した情報または各種センサで観測された作物に関する観測データ（葉の枚数、茎の長さ、茎の太さ、実の数、実の大きさなど）に基づいて、熟練した農業従事者が暗黙知によって判定する。よって、従来研究[8]における生育状態既知という仮定は、生育状態を常に熟練した農業従事者が判定するという仮定と同じである。

スマート農業では、熟練した農業従事者と同レベルの農業を経験の浅い農業従事者にも可能にすることが目標である。よって、各種センサによる観測データに基づいて自動的／半自動的に生育状態が判定／推定される仕組が望ましい。そこで、本研究では輪作と栽培管理を統合した生育状態既知の従来研究[8]の問題設定を、生育状態が未知（熟練した農業従事者による生育状態の判定を仮定しない）のセンサを伴うスマート農業に拡張したもとで、期待収益を最大化する統合管理方法を提案する。なお、栽培管理に関する従来研究[7]では、本研究同様にセンサを伴うスマート農業を仮定し、生育状態未知の栽培管理を検討している。よって、本研究は従来研究[7]の問題設定を、市場価格の変動を考慮した統合管理に拡張した研究とも解釈できる。

センサを伴うスマート農業に関する実用化例も既に報告されている[6]。しかし、観測データに基づく生育状態の自動判定などの検討は十分ではない。そのため、実用化例で安定的な生産に関する良好な結果が報告されているのは、生育状態に応じた適応的な栽培行動選択の必要性が少ない（栽培が容易な）作物（主に葉物）が主である。本研究は、生育状態に応じた適応的な栽培行動選択の必要性が高い（栽培が難しい）作物に対するスマート農業の可能性を模索する研究でもある。

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う。具体的な簡易な設定部分については次章で説明するが、今後、より現実に近い問題設定を検討する必要がある。

2. 準備

本研究で使用する記号などを説明する。本研究では、センサを伴う生育状態未知のスマート農業における、作物の価格が変動する場合の輪作と栽培管理を統合した統合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。なお、記号の定義の多くは生育状態既知の従来研究[8]と同様である。

$a_{1,i} \in A_1$ 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。本研究では、センサによる観測データに基づく熟練した農業従事者による生育状態の判定を仮定しないので、生育状態そのものは未知である。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。生育状態は時期 (発芽時期や着果時期など) によって、芽に関する状態、果実に関する状態などのように時期ごとに異なる状態定義も考えられるが、従来研究[8]同様に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。仮に収穫期であれば、添え字番号が小さい状態ほど豊作の可能性が高いことを示す。生育期であれば、添え字番号が小さい状態ほど葉の付き方 (密集具合) や栄養状態などが良いことを示す。また、現実の農業では全状態に関する良し悪しの順序づけが可能とは限らない。

$a_{2,i} \in A_2$ 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、従来研究[8]同様に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、従来研究[8]同様に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

実施したもとの、次の生育状態が s_l になる生育状態遷移確率を示す。 $h_i \in H$ は i 番目の収穫量 (トン) を示し、 $H = \{h_1, h_2, \dots, h_{|H|}\}$ は収穫量の集合である。 $\Pr(h_k | s_j, a_{1,i})$ は作物 $a_{1,i}$ を栽培中の生育状態 s_j において収穫量 h_k が得られる収穫確率を示す。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後に、遷移先の生育状態 s_j と栽培中の作物 $a_{1,i}$ に応じた収穫確率 $\Pr(h_k | s_j, a_{1,i})$ に従って収穫量 h_k 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、作物 $a_{1,i}$ で収穫量 h_k の場合の売上 (収入) は $p(a_{1,i}) h_k$ である。

本研究では、生育状況を畑で直接観察しない代わりに、センサによる観測結果の観測値で生育状況を把握する。 $o_i \in O$ はセンサの i 番目の観測値を示し、 $O = \{o_1, o_2, \dots, o_{|O|}\}$ は観測値集合である。 $\Pr(o_k | s_j, a_{1,i})$ は作物 $a_{1,i}$ を栽培中の生育状態 s_j においてセンサが観測値 o_k を観測する観測確率を示す。観測確率という呼び方のため、センサそのものに確率的な誤差などを仮定しているように聞こえるかも知れないが、本研究ではセンサの精度は十分に高いことを想定し、確率的な誤差などは仮定していない。確率的なのは作物側である。

例えば、実がなる時期に「小さな実が1つのみ」という観測データ (生育状況) が得られたとする。この「小さな実が1つのみ」という事象は、「栄養不足の生育状態」から発生した可能性と、「栄養が足りた生育状態」から発生した両方の可能性がある。実が少ない/小さいという理由で単純に栄養不足と判定して追肥 (肥料を追加すること) を実施しても、判定ミスで結果的に肥料が多すぎることもある。熟練の農業従事者であれば暗黙知で精度良く生育状態を判定できるが、暗黙知についてはまだ不明な点が多い。そこで、本研究では「栄養不足の生育状態」から「小さな実が1つのみ」という事象が起きる確率を考え、統計的に暗黙知の代用を模索する。この確率を観測確率と呼んでいる。

本研究では簡便のため、センサが1種類しかないように見える定義 (書き方) となっているが、複数のセンサの組として解釈することも可能である。また、明示的に複数のセンサを表現するように本研究の定義を拡張す

ることも容易である。

本研究では、センサの観測対象として上記のように作物のみを考慮している。実用化されている現実のスマート農業では気温、湿度などの環境に関する観測もセンサで行っているが、本研究では環境に関してはモデル化を省略している。環境に関する観測を省略するという仮定は、環境に関しては一定の（標準的な）環境が維持されているという仮定とも解釈できる。気温、湿度などの環境面が人為的に制御可能な条件下におけるスマート農業の一形態として、植物工場[6]がある。本研究では簡易な問題設定を仮定しているため、現実のスマート農業とは異なる点が多いが、その中でも植物工場はイメージが近いと考えられる。なお、今後、本研究に関しても環境面のモデル化を追加検討する必要がある。

本研究では、連作障害が該当する作物は当該年の選択枝から除外し、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 $T'T$ 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、生育状態既知の従来研究[8]と同様に、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、 $T'(T+1)$ 回意思決定を伴う問題を、 T 回の栽培行動選択を行う栽培管理問題と T' 回の栽培作物選択を行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、統合管理問題を栽培管理問題と輪作問題に分割するが、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することによって、統合的な最適解を算出する点は、センサを伴わない生育状態既知の統合管理の従来研究[8]と同様である。

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 $p(a_{1,i})h_k$ と栽培行動コストが利得に相当する。

3. 価格固定の場合の統合管理（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、センサを伴う生育状態未知のスマート農業における価格固定の場合の統合管理について説明する。本比較対象は、センサを伴わない生育状態既知の従来研究[8]における比較対象を、センサを伴う生育状態未知の場合に拡張したものである。

3.1 価格固定の場合の栽培管理

栽培管理における栽培行動の選択方法について説明する前に、選択方法の中で使用する生育状態の事後確率の計算について説明する。

t 期の生育状態を $X_t \in S$ 、 t 期の栽培行動を $Y_t \in A_2$ 、 t 期の観測値を $W_t \in O$ とする。作物 $a_{1,i}$ を栽培中の t 期の観測値 W_t を観測する前の生育状態 s_j の事後確率を $\Pr(s_j | W^{t-1}Y^{t-1}, a_{1,i})$ 、 $W^{t-1} = W_1W_2 \dots W_{t-1}$ 、 $Y^{t-1} = Y_1Y_2 \dots Y_{t-1}$ とする。 $W^{t-1}Y^{t-1}$ は、それまでの観測値と栽培行動の履歴情報である。観測値 W_t を観測したもとの事後確率 $\Pr(s_j | W^{t-1}Y^{t-1}, a_{1,i})$ は観測後の事後確率 $\Pr(s_j | W^tY^{t-1}, a_{1,i})$ に更新される。

$$\Pr(s_j | W^tY^{t-1}, a_{1,i}) = \frac{\Pr(s_j | W^{t-1}Y^{t-1}, a_{1,i})\Pr(W_t | s_j, a_{1,i})}{\sum_{s_k \in S} \Pr(s_k | W^{t-1}Y^{t-1}, a_{1,i})\Pr(W_t | s_k, a_{1,i})}. \quad (2)$$

t 期の栽培行動 Y_t 選択後には、観測後の事後確率 $\Pr(s_j | W^tY^{t-1}, a_{1,i})$ は生育状態の遷移後の事後確率

（ $t+1$ 期の観測前の事後確率） $\Pr(s_j | W^tY^t, a_{1,i})$ に更新される。

$$\Pr(s_j | W^tY^t, a_{1,i}) =$$

$$\sum_{s_k \in S} \Pr(s_k | W^t Y^{t-1}, a_{1,i}) \Pr(s_j | s_k, Y_t, a_{1,i}). \quad (3)$$

$t = 1$ 期の場合の観測値 W_1 を観測する前の

$\Pr(s_j | W^{t-1} Y^{t-1}, a_{1,i}) = \Pr(s_j | W^0 Y^0, a_{1,i})$ は生育状態 s_j の事前確率に相当し、初期生育状態確率 $\Pr(s_j | a_{1,i})$ を事前確率とする。

T 回の栽培行動の選択を行う T 期間の栽培管理問題について考える。作物 $a_{1,i}$ を栽培中の1期の観測値 W_1 を観測したもと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 ($1 \leq t \leq T$) の処理を以下に示す。

$$v_1(W^t Y^{t-1}, a_{1,i}, t) = \max_{Y_t \in A_2} -b(Y_t) + \sum_{X_t \in S} \sum_{X_{t+1} \in S}$$

$$\Pr(X_t | W^t Y^{t-1}, a_{1,i}) \Pr(X_{t+1} | X_t, Y_t, a_{1,i}) v', \quad (4)$$

ただし、 $t = T$ の場合、

$$v' = \sum_{h_j \in H} \Pr(h_j | X_{t+1}, a_{1,i}) p(a_{1,i}) h_j, \quad (5)$$

$1 \leq t < T$ の場合、

$$v' = \sum_{W_{t+1} \in O} \Pr(W_{t+1} | X_{t+1}, a_{1,i}) v_1(W^{t+1} Y^t, a_{1,i}, t+1). \quad (6)$$

ただし、 $v_1(W^t Y^{t-1}, a_{1,i}, t)$ は t 期以降の期待収益の最大値であり、式(4)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(4)の右辺第1項の $b(Y_t)$ は栽培行動 Y_t のコストである。栽培行動のコストは栽培行動の選択に伴う確定的な値なので、第2項の期待値計算とは別に第1項としている。 T 期から1期まで遡りながら式(4)で処理することにより、作物 $a_{1,i}$ を栽培中の1期に観測値 W_1 を観測したもとの期待収益の最大値 $v_1(W_1, a_{1,i}, 1)$ が算出できる。これを全作物、全観測値について算出する。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(栽培作物の選択)

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 が輪作問題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。

$$X'_t = (Y'_{t-N}, \dots, Y'_{t-2}, Y'_{t-1}), \quad (7)$$

ただし、 Y'_t は t 年目の栽培作物を示す変数である。 t 年目の状態 X'_t は過去 N 年間の栽培作物の履歴情報である。 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 ($1 \leq t \leq T'$) の処理を以下に示す。

$$v_2(X'_t, t) = \max_{Y'_t \in A_1(X'_t)} \sum_{s_i \in S} \sum_{o_j \in O} \Pr(s_i | Y'_t) \Pr(o_j | s_i, Y'_t) v_1(o_j, Y'_t, 1) + v_2(X'_{t+1}, t+1), \quad (8)$$

ただし、

$$A_1(X'_t) = \{a_{1,j} | \forall k, 1 \leq k \leq N,$$

$$c(a_{1,j}) \neq c(Y'_{t-k}) \forall n (Y'_{t-k} < k), \quad (9)$$

$$v_2(X'_{T'+1}, T'+1) = 0, \quad (10)$$

$A_1(X'_t)$ 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を示す。 $v_2(X'_t, t)$ は t 年目以降の期待収益の最大値であり、式(8)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(8)の右辺から仕入コストを引くことになる。

4. 価格変動の場合の統合管理(提案方法)

本研究の提案方法である、センサを伴う生育状態未知のスマート農業において相場状態に応じて価格が変動する場合の統合管理について説明する。

4.1 価格変動の場合の準備

作物価格の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[9]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 $a_{1,i}$ を栽培中の1期の観測値が W_1 、作物 $a_{1,i}$ の前年の相場状態が $Z \in M$ のもと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 ($1 \leq t \leq T$) の処理を以下に示す。

$$v_1(W^t Y^{t-1}, Z, a_{1,i}, t) = \max_{Y_t \in A_2} -b(Y_t) + \sum_{X_t \in S} \sum_{X_{t+1} \in S}$$

$$\Pr(X_t | W^t Y^{t-1}, a_{1,i}) \Pr(X_{t+1} | X_t, Y_t, a_{1,i}) v', \quad (11)$$

ただし, $t = T$ の場合,

$$v' = \sum_{h_j \in H} \sum_{m_k \in M} \Pr(h_j | X_{t+1}, a_{1,i}) \Pr(m_k | Z) p(m_k, a_{1,i}) h_j, \quad (12)$$

$1 \leq t < T$ の場合,

$$v' = \sum_{W_{t+1} \in O} \Pr(W_{t+1} | X_{t+1}, a_{1,i}) v_1(W^{t+1} Y^t, Z, a_{1,i}, t+1). \quad (13)$$

ただし, $v_1(W^t Y^{t-1}, Z, a_{1,i}, t)$ は t 期以降の期待収益の最大値であり, 式(11)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。事後確率の計算は3.1節と同様である。 T 期から1期まで遡りながら式(11)で処理することにより, 作物 $a_{1,i}$ を栽培中の1期に観測値 W_1 を観測し, 前年の相場状態が Z のもとでの期待収益の最大値 $v_1(W_1, Z, a_{1,i}, 1)$ が算出できる。これを全作物, 全観測値, 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。

$$X'_t = (Y'_{t-N}, \dots, Y'_{t-1}, Z'_{t-1}), \quad (14)$$

$$Z'_{t-1} = (Z'_{t-1,1}, \dots, Z'_{t-1,|A_1|}), \quad (15)$$

ただし, Y'_t は t 年目の栽培作物を示す変数である。 Z'_{t-1} は $t-1$ 年目の作物の相場状態情報で, $Z'_{t-1,i} \in M$ 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 ($1 \leq t \leq T'$) の処理を以下に示す。

$$v_2(X'_t, t) = \max_{Y'_t \in A_1(X'_t)} \sum_{s_i \in S} \sum_{o_j \in O} \Pr(s_i | Y'_t) \Pr(o_j | s_i, Y'_t)$$

$$v_1(o_j, Z'_{t-1, I(Y'_t)}, Y'_t, 1) +$$

$$\sum_{Z'_t \in M^{|A_1|}} \prod_{i=1}^{|A_1|} \Pr(Z'_t | Z'_{t-1,i}) v_2(X'_{t+1}, t+1), \quad (16)$$

ただし,

$$A_1(X'_t) = \{a_{1,j} | \forall k, 1 \leq k \leq N, c(a_{1,j}) \neq c(Y'_{t-k}) \forall n(Y'_{t-k}) < k\}, \quad (17)$$

$$v_2(X'_{T'+1}, T'+1) = 0, \quad (18)$$

$I(Y'_t)$ は作物 Y'_t の番号, $A_1(X'_t)$ は式(9)同様に状態 X'_t で選択可能な作物集合を示す。 $v_2(X'_t, t)$ は t 年目以降の期待収益の最大値であり, 式(16)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(16)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/農業試験場などから実データを入手することが考えられる。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(栽培作物の選択回数) $T' = 5$, 期数(栽培行動の選択回数) $T = 5$, 栽培行動数 $|A_2| = 3$, 収穫量の数 $|H| = 3$, 観測値の数 $|O| = 3$ 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, 収穫量 h_i を表3に示す。

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 $b(a_{2,i})$ (万円)

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

表3. 収穫量 h_i (トン)

h_1	h_2	h_3
100	70	40

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, 収穫確率 $\Pr(h_k|s_j, a_{1,i})$ を表5, 観測確率 $\Pr(o_k|s_j, a_{1,i})$ を表6に示す。ただし、簡便のため全作物 $a_{1,i}$ で同じ確率とした。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 $\Pr(m_1|m_1) = \Pr(m_2|m_2)$ となるように設定した。

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

表5. 収穫確率 $\Pr(h_k|s_j, a_{1,i})$

	$k = 1$	$k = 2$	$k = 3$
$j = 1$	0.85	0.1	0.05
$j = 2$	0.1	0.8	0.1
$j = 3$	0.05	0.1	0.85

表6. 観測確率 $\Pr(o_k|s_j, a_{1,i})$

	$k = 1$	$k = 2$	$k = 3$
$j = 1$	0.8	0.1	0.1
$j = 2$	0.1	0.8	0.1
$j = 3$	0.1	0.1	0.8

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7がパターン1, 表8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[9]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 $\Pr(m_1|m_1) = \Pr(m_2|m_2)$ のもとでは、定常確率は状態 m_1, m_2 ともに0.5である。

表7. 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8. 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。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。

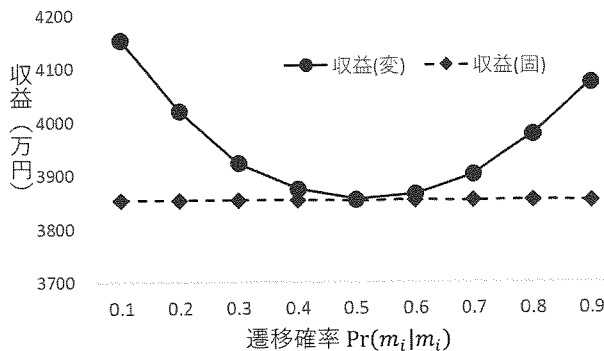


図1. 収益（万円/5年）の比較（パターン1）

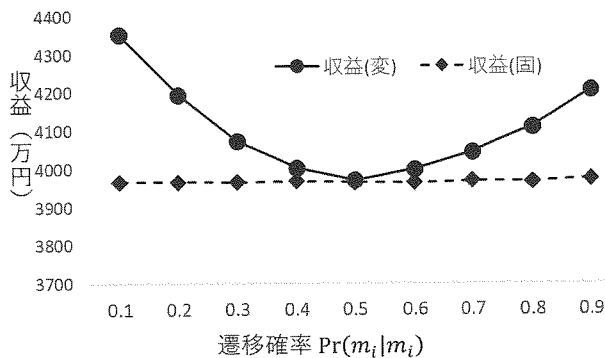


図2. 収益（万円/5年）の比較（パターン2）

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

平均収益が大きい傾向が確認できる。また、生育状態既知の場合の期待収益に対する提案方法の割合は99.72%から99.87%だった。今回の各種設定のもとでは、センサによる観測値に基づいて生育状態について十分に学習し、栽培作物の選択（輪作）と栽培管理の統合管理が適切に実施できていると考えられる。

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可能性があることがわかった。この性質はセンサを伴わない生育状態既知の従来研究[8]と同様である。

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9に示す。表中の事後 s_i は生育状態の事後確率 $\Pr(s_i|W^t Y^{t-1}, a_{1,i})$ である。

表9. 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	4			4		
事後 s_1	0.0889			0.3864		
事後 s_2	0.0896			0.5888		
事後 s_3	0.8215			0.0248		
Z	-	m_1	m_2	-	m_1	m_2
$a_{1,i}$	$a_{1,6}$			$a_{1,1}$		
Y_t	$a_{2,1}$	$a_{2,2}$	$a_{2,1}$	$a_{2,3}$	$a_{2,3}$	$a_{2,2}$

表9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 $a_{1,6}$ の栽培管理で4期に生育状態 s_3 の事後確率が高い場合である。価格固定の固1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2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1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 $a_{1,1}$ の栽培管理で4期に生育状態 s_1 と s_2 の事後確率が高い場合である。価格固定の固2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3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4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7及び表8の作物価格のみなので、各作物に関する栽培管理ではパターン間の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10に示す輪作年限が2年の作物 $a_{1,2}$, 作物 $a_{1,4}$, 作物 $a_{1,6}$ によるローテーション, パターン2については表11に示す輪作年限が1年の作物 $a_{1,1}$, 作物 $a_{1,3}$ によるローテーションがほとんどである。

表10. 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11. 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}	$a_{1,1}$	$a_{1,3}$	$a_{1,1}$	$a_{1,3}$	$a_{1,1}$
Y'_{t-1}	$a_{1,3}$	$a_{1,1}$	$a_{1,3}$	$a_{1,1}$	$a_{1,3}$
Y'_t	$a_{1,1}$	$a_{1,3}$	$a_{1,1}$	$a_{1,3}$	$a_{1,1}$

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12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では前年の相場状態に応じて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13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、提案方法ではセンサの観測値に基づいて生育状態について学習（事後確率を更新）し、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可能性があることが確認できた。これらの性質は、センサを伴わない生育状態既知の統合管理に関する従来研究[8]における価格固定の場合との比較

と同様である。

表12. 提案方法のパターン1での作物選択例

($\Pr(m_i|m_i) = 0.1$)

	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}	$a_{1,6}$	$a_{1,6}$	$a_{1,2}$	$a_{1,2}$
$Z'_{t-1,1}$	m_1	m_1	m_2	m_2
$Z'_{t-1,2}$	m_1	m_1	m_2	m_2
$Z'_{t-1,3}$	m_1	m_2	m_2	m_2
$Z'_{t-1,4}$	m_1	m_1	m_2	m_2
$Z'_{t-1,5}$	m_1	m_1	m_2	m_2
$Z'_{t-1,6}$	m_1	m_1	m_2	m_1
Y'_t	$a_{1,4}$	$a_{1,3}$	$a_{1,6}$	$a_{1,5}$

表13. 提案方法のパターン2での作物選択例

($\Pr(m_i|m_i) = 0.1$)

	例1	例2	例3	例4
t	2	2	5	5
Y'_{t-2}	$a_{1,3}$	$a_{1,3}$	$a_{1,1}$	$a_{1,1}$
Y'_{t-1}	$a_{1,1}$	$a_{1,1}$	$a_{1,3}$	$a_{1,3}$
$Z'_{t-1,1}$	m_1	m_1	m_1	m_1
$Z'_{t-1,2}$	m_1	m_1	m_1	m_1
$Z'_{t-1,3}$	m_1	m_1	m_1	m_1
$Z'_{t-1,4}$	m_1	m_1	m_1	m_1
$Z'_{t-1,5}$	m_1	m_1	m_1	m_2
$Z'_{t-1,6}$	m_1	m_2	m_1	m_1
Y'_t	$a_{1,3}$	$a_{1,6}$	$a_{1,1}$	$a_{1,5}$

6. 考察と今後の課題

6.1 考察

本研究では、センサを伴う生育状態未知のスマート農業を対象に、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統合管理方法を提案した。提案方法の有効性を検証するために行ったシミュレーションでは、比較対象である価格変動を考慮しない場合の統合管理と比較し、提案方法の適応的な作物選択、栽培行動選択の有効性を確認した。

本研究における価格固定の場合との比較で確認された性質（有効性）は、センサを伴わない生育状態既知の統合管理を検討した従来研究[8]と同様であった。この

ことは、生育状態が未知（熟練した農業従事者による生育状態の判定を仮定しない）のセンサを伴うスマート農業に関して、センサの観測結果から適切に生育状態について学習することによる、価格変動を考慮した収益性の高い農業の可能性を示唆している。

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られる農業収益の理論的限界値とも解釈できる。よって、本研究の問題設定に対する（提案方法よりも処理が容易な）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も可能である。

5章で紹介した比較結果（図1及び図2）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対して近似解法として適用する際の、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 $Pr(m_i|m_j)$ 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、生育状態の遷移確率や収穫確率など各種確率（各種確率分布の真のパラメータ）が既知と仮定して検討したが、実際の農業ではこれらの確率は未知である。よって、本研究の問題設定を確率が未知の設定に拡張する必要がある。

確率が未知の場合には、既存データの活用と新規データの収集が重要である。仮に検討対象地域に関する既存データがない（あるいは不足する）場合でも、近隣地域や気候が類似した地域の既存データの活用が考えられる。これらの他地域の既存データと検討対象地域間の類似性を学習することにより、他地域の既存データを活用した意思決定（統合管理）が可能である。また、新規デ

ータの収集については、農業試験場などにおける試験栽培に必要な期間やコストを考慮すると、効率的なデータ収集方法である能動学習の適用も考えられる。

本研究で従来研究[8]同様に確率モデルとして採用したマルコフ決定過程の確率未知の場合については、ベイズ学習に関する従来研究[10][11]などがある。センサを伴うスマート農業に関する確率未知の場合についても、これらのベイズ学習の知見が活用可能と考える。

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。作物の市場価格の変動を考慮した生育状態既知の統合管理に関する従来研究では、生育状態が未知（熟練した農業従事者による生育状態の判定を仮定しない）のセンサを伴うスマート農業には対応していない。そこで、本研究では生育状態未知のセンサを伴うスマート農業における、市場価格の変動を考慮した統合管理方法を提案した。

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、提案方法による適応的な栽培作物と栽培行動の選択の有効性を確認した。また、センサの観測結果に基づいて生育状態について適切に学習できた場合には、生育状態既知の場合との差が小さいことも確認できた。

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。

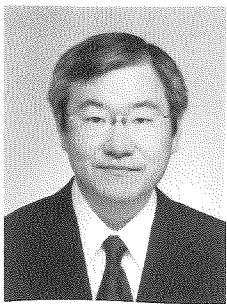
謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 JP21K04543 の助成による。

参考文献

- [1] T. 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・ファジィ・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. 400-401, 2021.
- [8] 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.
- [9] 森村英典, 高橋幸雄: マルコフ解析, 日科技連, 東京, 1979.
- [10] J.J. Martin: Bayesian Decision Problems and Markov Chains, John Wiley & Sons, 1967.
- [11] 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。