IoT 技術を用いた圃場情報を基礎とする周年多回転栽培作物における 農業生産システムのモデル化とシミュレーション

日比野 浩典^{*1}, 久保 直輝^{*2}, 松本 悠作^{*2}, 木村 誠^{*3}, 水上 洋介^{*4}

Modelling and simulation of agricultural production system of multiple-crop rotation based on IoT cultivated field information

Hironori HIBINO^{*1}, Naoki KUBO^{*2}, Yusaku MATSUMOTO^{*2},
Makoto KIMURA^{*3} and Yosuke MIZUKAMI^{*4}

^{*1} Department of Industrial Administration, Faculty of Science and Technology, Tokyo University of Science
2641 Yamazaki, Noda-shi, Chiba 278-8510, Japan

^{*2} Department of Industrial Administration, Graduate school of Science and Technology, Tokyo University of Science
2641 Yamazaki, Noda-shi, Chiba 278-8510, Japan

^{*3} HATAKE Company, Ltd
1470-5 Nishitakano, Tsukuba-shi, Ibaraki 300-2613, Japan

^{*4} AGROPOLIS LLC.
2675-1 Notsumachinotsuichi, Usuki-shi, Oita 875-0201, Japan

Received: 20 March 2018; Revised: 8 October 2018; Accepted: 1 March 2019

Abstract

It is becoming necessary for agriculture companies to deal with daily stable supplies for farm produces because customers who hope to achieve quality of life (QOL) in daily meal are getting increasing. Therefore, it is increasingly important to research and develop agricultural production systems to deal with daily stable supplies for farm produces. The amount of daily demands for the farm produces fluctuates because customer behaviors have fluctuations. The amount of daily supplies for the farm produces also fluctuates because makespans of the farm produces cultivated in fields have fluctuations. The makespan defines as the time difference between the start and finish of a sequence to harvest the farm produces. Therefore differences between the supply and the demand often occur. By occurring the fluctuations for the makespans, lack of stock and crop loss often occurs in the agriculture companies. The crop loss refers to situations in which goods that could have been consigned were not. This is due to the consignment criteria not being met because of issues such as time delays. In this research, we propose modelling and simulation of the agricultural production system to evaluate and reduce the lack of stock and crop loss due to the uncertainties surrounding the amount and units harvested and produce growth in the cultivated fields. We investigate cultivated field production processes to harvest the farm produces by a multiple-crop rotation. We also investigate various cultivated field data by IoT (Internet of Things) technologies. We propose a cultivated field production process model and crop growth prediction algorithm for application in our proposed simulation. We verify our proposed simulation through case studies.

Keywords : Agriculture production system, Modelling and simulation, IoT, Growth period, Baby leaves

1. 緒 言

農業分野では、消費者の QOL 向上に対応するため、作物の 1 年 365 日の安定供給が求められ始めており、農業の生産システム化が重要となりつつある。農業を生産システム化し、作物供給などのものの流れ、および、需要情報や生産管理情報などの情報の流れを考慮する農業生産システムを保有する農業法人が増えつつある。農作物の作付方法は三種類に分類可能である。三種類の作物とは、一毛作、二毛作、および、多毛作である(三省堂, 2006)。一毛作、および、二毛作で作付された作物は一般的にはストック型の作物として扱われる。例えば、稲作、馬鈴薯などである。他方で、多毛作で作付された作物は日々供給が可能な、周年多回転栽培の作物(周年多回転作物)であり、フロー型の供給可能な作物として扱われる。特に、周年多回転栽培の作物では、栽培の繰り返しが頻繁に発生する。それに伴い、播種日をずらしながら複数圃場で栽培する必要がある。また、周年多回転栽培の作物では、複数の圃場を保有し、播種日、播種圃場、播種量などを経験に基づき策定することが多い。これらのため、周年多回転作物の栽培では、供給のより効率化のための生産管理技術が重要となりつつある。他方で、供給において植物工場では研究が進展しており安定供給は可能であるが、供給コストが高いという課題がある(高辻, 2010)。そのため、実際の農業生産システムにおいて、植物工場の利用は限定的である。実際の農業生産システムにおいてはハウス栽培や露地栽培での周年多回転作物の供給が一般的である。しかし、ハウス栽培と露地栽培では、供給において、圃場における作物の生長の不確実性に伴い、不確実性が生じる。また、消費者の作物に対する需要は、価格や見た目といった条件により変動する(駄田井, 2004)。そのため、需要と供給には差が生じ易い。特に、圃場では作物の生長にばらつきが存在し、播種から刈取までの期間や刈取量が予測から外れ、欠品、および、優良ロスが発生する。優良ロスとは出荷可能である作物が時間経過等により出荷基準を超えて生長し、製品として出荷できなくなる損失を示す。

農業生産システムの先行研究では、ハウス栽培や露地栽培の圃場のデータについて蓄積、および、管理を行う情報ネットワークシステムについて提案されている(星他, 2013, 高山, 2013, Zhang et al., 2016)。例えば、星らは携帯電子機器とユビキタス環境制御システムを用いて、手軽で安価に温湿度、日照量、CO₂ 濃度のデータ蓄積を行うシステムを開発した。他方で、蓄積したデータを農業生産システムで利用する研究が実施されている(松倉他, 2015, 戸上他, 2011)。戸上らは圃場環境の変動とミカンの品質情報の推移とばらつきについて比較、分析を行い、ミカン生産の品質と圃場環境の関係の研究を実施した。松倉らは稲作における規模の拡大と農業従事者の技術・技能の変動がコストの削減に影響する効果について、シミュレーションを用いて事前評価技術を提案した。これらの研究から、圃場の情報ネットワークシステムと、蓄積したデータを用いた品質の向上やコストの削減に関する研究は実施されている。しかしながら、農業生産システムとして供給の不確実性について、研究が進展しておらず、農業生産システムの効率化の妨げとなっている。圃場での播種・刈取等の生産作業プロセス、および、生長の不確実性を考慮し、生産計画に基づき播種日、播種圃場、播種量などを計画し、欠品、および、優良ロスを事前評価可能な手法の開発が求められている。

そこで、本研究では、農業生産システムにおける圃場での播種・刈取等の生産作業プロセスと生長の不確実性を考慮し、周年多回転栽培の作物における欠品、および、優良ロスの事前評価を実施するため、シミュレーション手法を開発する。まず、圃場における欠品、および、優良ロスの発生原因を整理する。次に、生産作業プロセスと作物の生長プロセスを調査する。その際、IoT を利用して圃場からデータを収集し、生長の統計的な扱い方について調査する。これらの調査の結果から、圃場の生産作業プロセスのモデル化、および、作物の生長予測アルゴリズムを提案し、シミュレーションに実装する。ケーススタディにより、提案するシミュレーション手法の精度の検証を行う。また、提案するシミュレーション手法を利用して、需要の変動を考慮する欠品、および、優良ロス評価を行う。

2. 圃場における欠品、および、優良ロスの分析

2・1 圃場における欠品、および、優良ロスの発生原因

欠品、および、優良ロスの発生について分析する。作物の生長にばらつきが存在せず、播種時に想定した刈取予定日に刈取予定量の刈取を行うことができた場合、欠品、および、優良ロスは発生しない。作物の生長にばらつきが存在する場合、ある一つの圃場が関係する欠品、および、優良ロスの発生原因を以下に示す。

- 発生原因 1 刈取予定日の刈取量が播種時に想定した予定刈取量より少ない場合、欠品が発生する。
- 発生原因 2 刈取予定日の刈取量が播種時に想定した予定刈取量より多い場合、他の圃場の刈取量を減らし、刈取日を遅らせて調整することにつながり、結果として優良ロスが発生する場合がある。
- 発生原因 3 刈取予定日に生長度合いを示す生長値（例えば、大きさ等）が出荷基準に達しておらず、刈取を行うことができない場合、欠品が発生する。
- 発生原因 4 刈取予定日に生長値が出荷基準を超えており、刈取を行うことができない場合、優良ロスが発生する。

発生原因 1, および、発生原因 2 は、作物の生長のばらつきに伴い単位面積当たりの刈取量（単収）が変動するため生じる。発生原因 3, および、発生原因 4 は、作物の生長のばらつきに伴い生長値が出荷基準を満たす期間が変動するため生じる。

2・2 欠品, および, 優良ロス評価の必要項目

欠品, および, 優良ロスを事前評価するために必要な項目について分析する。

欠品, および, 優良ロスは刈取量と生育期間のばらつきにより発生する。刈取量は、単位面積当たりの刈取量を示す単収値と作付面積に依存する。単収値は変動するため、刈取量は変動する。作物が出荷基準を満たしている期間は、周年多回転栽培の作物において、生長度合いを示す生育値により変動する。そのため、欠品, および, 優良ロスについて評価するためには作物の生長プロセスを調査し、播種後の単収値と生育値の変化について明らかにする必要がある。具体的には、播種後の経過時間と、単収値, および, 生育値としての生長値(例えば大きさ)の関係を明らかにする。また、出荷基準値について明らかにする。

また、農業生産システムでは複数の圃場を運用して、作物供給を行う。特に、周年多回転栽培の作物では、多くの圃場を保有し、播種回数、播種圃場、播種量などを経験的に決める場合が多い。欠品, および, 優良ロスの評価を行うためには、圃場の運用について考慮する必要がある。例えば、播種を行いたい時に、播種可能な圃場がない場合は、将来の欠品となる。そのため、保有必要圃場数などを考慮する必要がある。圃場の運用を考慮するためには、圃場単位の生産作業プロセスについて明確にし、各圃場の稼働、非稼働の状態に応じて播種を割り当てる必要がある。具体的には、栽培の1回転について、播種、刈取、刈取後後の次回播種に向けた準備作業などの一連の生産作業プロセスを明らかにし、それぞれの生産作業状態とその遷移の関係を明確にする必要がある。また、生産作業プロセスと生長プロセスは関係性が高い。生産作業プロセスと生長プロセスとの関係を明らかにする必要がある。

3. 圃場の調査, および, 分析

本研究では、ベビーリーフを生産している圃場を利用して作物の生産作業プロセス, および, 生長プロセスについて調査を行う。ベビーリーフは周年多回転栽培作物である、発芽後2週間から3週間で収穫する若い葉菜の総称である。対象作物はベビーリーフにおいて製品含有率の高い、周年多回転栽培作物のピノグリーン（幼生コマツナ）とする（HATAKE カンパニー, 2016）。生産作業プロセスの調査は2014年7月3日から2016年5月11日、生長プロセスの調査は2016年4月11日から2016年5月11日の期間に実施した。

3・1 圃場における生産作業プロセス, および, 生長プロセスの調査

播種から刈取までの圃場の状態とその遷移について明らかにするため、圃場における生産作業プロセス, および, 生長プロセスの調査を行った。

圃場における生産作業プロセスを圃場状態と作物状態の二つの状態に分割し、提案する。圃場状態は五つのサブ状態から構成される。養生状態、播種待機状態、栽培状態、刈取状態、休耕状態である。作物状態は三つのサブ状態から構成される。播種から出荷基準を満たす間の生長未適期状態、作物の生長が出荷基準を満たしている刈取適期状態、作物の生長が出荷基準を超えた生長超過状態である。作物が生長未適期状態である時に供給指示

が発生した場合、需要に応じることができず、欠品が発生する。また、作物が生長超過状態となった場合、作物が出荷基準を満たさず優良ロスとなる。

圃場状態と作物状態における、各サブ状態について以下に示す。調査結果から得られた圃場の生産作業プロセス、および、生長プロセスを図1に示す。

【圃場サブ状態】

- 養生状態 : 圃場環境を整え、作物生育のための準備をする状態
- 播種待機状態 : 養生を終え、播種が行われるまでの待機状態
- 栽培状態 : 播種から刈取までを表す、圃場に作物が存在する状態
- 刈取状態 : 圃場で生育した作物に対して刈取を行っている状態
- 休耕状態 : 刈取が終了してから次の養生が行われるまでの待機状態

【作物サブ状態】

- 生育状態 : 播種後、作物の生育値が出荷基準を満たすまでの状態
- 刈取適期状態 : 作物の生育値が出荷基準を満たしている状態
- 生育超過状態 : 作物が出荷基準を超えて生育した状態

Fig. 1 Product processes in a cultivated field.

3・2 IoTに基づく作物の生長プロセスの分析

作物の生長プロセスを、IoTを利用して圃場を観察し、測定データをクラウドシステム(富士通エフサス, 2016)に蓄積した。圃場でのIoTの利用方法を図2に示す。センサーで取得する情報は、湿度、気温、地温、散水量、日照量である。各センサーでは、30日間、30分毎に計測を行った。センサーでの取得が難しい生育値、単収値の情報は人手で30日間、50サンプル計測した。生育値 h cm は、HATAKEカンパニーの規格に従い、葉長 α (図3参照)を利用して式(1)で表す。得られた実測生育値を用いた実測生長曲線の近似曲線の推移を図3に示す。図3より、刈取予定日における実際の生長値(生育値)が明らかになった。

$$h = 1.5 \times \alpha \quad (1)$$

近似曲線と実測生長曲線の寄与率は0.99であり、実測生長曲線は、ロジスティック関数に近似できることが分かった。作物の生長曲線は一般的にロジスティック関数に近似される(松田他, 2011, 佐藤, 高橋, 2002, 土崎, 2011)ロジスティック関数の一般式を式(2)に示す。実際の圃場から得られた近似生長曲線式を、式(3)に示す。

$$h = \frac{K}{1 + be^{-ct}} \quad (2)$$

$$h = \frac{1.02 \times 10}{1 + 1.47 \times 10^3 \times e^{-0.45t}} \quad (3)$$

式(1)の t は作物の播種後の経過時間, h は作物の生育値を示す. ロジスティック関数には3つの係数が存在する. 3つの係数とは K , b , c であり, K は曲線の収束値, b は生長の初期値を決定し, c は傾きを決定する.

図3より, 日の実測生育値にはばらつきが存在することが確認された. 解析の結果から近似生長曲線における実測生育値の分布は, D'Agostino-Pearson 検定(D'Agostino et al., 1990)により, 正規分布に従うことを確認した.

Fig. 2 Use of IoT data in cultivated fields.

Fig. 3 Relationship between elapsed days after seeding and leaf length.

3・3 生育値と単収値の関係

刈取予定日における実際の刈取量を導出するため, 生育値と単収値の関係について調査を行った. 圃場から得られた生育値と単収値の関係を図4に示す. 実測生育値と実測単収値の関係を二次関数に近似したところ, 実測値と近似した二次関数の寄与率は0.95であり, 生育値と単収値の関係は二次関数に従う単収曲線に近似可能であることが分かった(データ数は, 1日あたり50サンプルを30日分). 単収値を U , 生育値を h としたとき, 実際の圃場から得られた単収曲線は式(4)で表される.

Fig. 4 Relationship between unit crop and leaf length.

3・4 生産作業プロセスと生長プロセスの関係

3・2節で生産作業プロセスを、3・3節で生長プロセスを、それぞれ明らかにした。図1における生産作業プロセスの、生育期間(Growth period), 刈取適期期間(Suitable harvest)は、生長プロセスと密な関係にある。生産作業プロセスと生長プロセスの関係について図5に示す。なお、図5は、図1における作物Iの例について図示する。

Fig.5 Relationship between production process and growth process.

4. 欠品, および, 優良ロスの事前評価シミュレーション手法

4・1 欠品, および, 優良ロスの事前評価シミュレーション手法の概要

提案する生産作業プロセスと生長プロセスの状態遷移モデル, および, IoT を利用して得られた生長曲線, 単収などの情報を利用して, 欠品, および, 優良ロスの事前評価のためのシミュレーション手法を提案する. シミュレーション手法の概要を図6に示す. シミュレーションは, 圃場状態と作物状態の2つの状態遷移モデル, および, 播種後の作物の生長プロセス調査結果を利用する生長予測アルゴリズムから構成される. 圃場状態, および, 作物状態の2つの状態遷移モデルを図7に示す. 農業生産システムには複数の圃場が存在し, それぞれの圃場において状態遷移モデルを保有する.

一つの圃場は, 圃場状態として, 5つのサブ状態を持ち, 遷移する.

まず, 播種の準備段階である養生を行う養生状態になり, その後, 播種待機状態となる.

播種の指示後に, 播種が行われ, 栽培状態になる. 栽培状態では, 生長予測アルゴリズムにより生育値が算出される. 生育値により, 作物状態は, 3つのサブ状態を持ち, 遷移する. 生育値が出荷基準を満たす間の生長未適期状態, 生育値が出荷基準を満たしている刈取適期状態, 生育値が出荷基準を超えた生長超過状態である. 生育値が基準を達していない場合, 刈取を実施できない.

供給指示に応じて圃場状態は, 刈取状態に遷移する. 生育値が基準を満たしている場合, 刈取は可能であり, 刈取後, 出荷する. 生育値が基準を超えている場合, 優良ロスとして廃棄する.

刈取後圃場状態は, 休耕状態に遷移する. 養生の指示により, 養生状態に遷移し, 次の, 播種に向けた生産作業プロセスに移る.

生長予測アルゴリズムについては, 次節以降に詳細を提案する.

播種の指示は, 事前に作成した日単位での播種圃場数を計画する播種計画により, 空いている播種待機状態の圃場を実施するものとする. 需要は, 入力情報とする. 出荷基準の生育値は, 帯域を入力する.

これらにより, 農業生産システムの評価に必要な欠品量, 欠品率, 優良ロス量, 優良ロス率, 圃場稼働率, 播種回数, 刈取量などを出力する. シミュレーションの結果として得られた欠品量, 欠品率, 優良ロス量, 優良ロス率, 圃場稼働率, 播種回数, 刈取量などを評価・検討し, 次回シミュレーションでの入力値等を再設定する.

Fig. 6 Proposed agricultural production system simulation.

Fig. 7 Stage transition model of cultivated field.

4・2 生長予測アルゴリズム

生長プロセス調査の結果を利用して作物の生長を予測するアルゴリズムを提案する。

生長予測アルゴリズムは3つのアルゴリズムから構成される。生長曲線予測アルゴリズム、刈取適期期間予測アルゴリズム、単収値予測アルゴリズムである。生長曲線予測アルゴリズムは、圃場から得られた生育値を利用し、生長のばらつきを考慮した予測生長曲線を生成する。刈取適期期間予測アルゴリズムは、生成された予測生長曲線、および、圃場で定められている作物の出荷基準から、予測刈取適期期間を生成する。単収値予測アルゴリズムは、生成された予測生長曲線、および、圃場から得られた単収曲線から刈取時における予測単収値を生成する。以上の生長予測アルゴリズムをシミュレーション上において播種一回ごとに生成し、その圃場における生育期間と単収値を生成する。生長予測アルゴリズムの概要を図8に示す。

Fig. 8 Crop growth prediction algorithm.

4・3 生長曲線予測アルゴリズム

生長プロセス調査により得られた生長曲線と生育値のばらつきを利用して予測生長曲線を生成するアルゴリズムを提案する。圃場から得られた生長曲線である式(2)における係数 K , b , c , および、実測中間点(t_{mf} , h_{mf})から予測生長曲線における係数 K_r , b_f , c_r を生成する。 t_{mf} は実測生長曲線の間を通る際の経過時間、 h_{mf} は実測

生長曲線における, 経過時間 t_{mf} の際の生育値を示す. また, c_r を生成するために, 予測中間点(t_{mf} , h_{mr})を生成する. h_{mr} は, h_{mf} に正規乱数に基づくばらつきを与えた値である. 予測中間点を生成する際に生長曲線にばらつきを与えることで生長のばらつきを考慮した予測生長曲線を生成する. 生長曲線予測アルゴリズムを以下に示す.

- STEP1.1 生長プロセス調査により得られた生長曲線から実測中間点における経過日数 t_{mf} を算出する. t_{mf} は生育値が $K/2$ cm における日を取得する.
- STEP1.2 経過日数 t_{mf} における予測中間点の生育値 h_{mr} を生成する. h_{mr} は, 圃場から得られた h_{mf} の平均値と標準偏差値に基づいて発生させる正規乱数値を利用する.
- STEP1.3 予測生長曲線の係数 K の値として正規乱数値 K_r を生成する. K_r は, 圃場から得られた K の平均値と標準偏差に基づいて発生させる正規乱数値を取得する.
- STEP1.4 予測生長曲線の係数 b の値として圃場から得られた生育値の実測値をロジスティック関数に近似して得られた係数 b_f を取得する.
- STEP1.5 予測生長曲線の係数 c の値として式(2)に t_{mr} , h_{mr} , K_r , b_f を入力し, c について解く. 得られた c を c_r として取得する. c_r は式(5)で表される.

$$c_r = \frac{1}{t_{mr}} \left[\log b_f - \log \left(\frac{K_r}{h_{mr}} - 1 \right) \right] \quad (5)$$

- STEP1.6 得られた K_r , b_f , c_r をロジスティック関数に代入することで予測生長曲線である式(6)を生成する.

$$h = \frac{K_r}{1 + b_f e^{-c_r t}} \quad (6)$$

4・4 刈取適期予測アルゴリズム

生成した予測生長曲線から刈取適期期間を予測するアルゴリズムを提案する. 作物の生長の速度による刈取適期期間の変動を予測するため, 生成した予測生長曲線から予測刈取適期期間 t_{ship} を生成するアルゴリズムを以下に示す.

- STEP2.1 作物の出荷基準を満たす規格下限値 h_{lf} と規格上限値 h_{hf} を入力する. 規格値は実際の圃場で利用される値を利用する.
- STEP2.2 予測生長曲線である式(6)に, t_{lr} と t_{hr} を代入することで刈取適期開始時刻, および, 刈取適期終了時刻を求める.
- STEP2.3 t_{lr} , および, t_{hr} から刈取適期期間 t_{ship} を算出する. t_{ship} は式(7)から求める.

$$t_{ship} = t_{hr} - t_{lr} \quad (7)$$

4・5 単収値予測アルゴリズム

生成した予測生長曲線から単収値を予測するアルゴリズムを提案する. 単収値は生育値と二次曲線の関係にある. 生育値の値によって単収値の変動を予測するため, 生成した予測生長曲線, および, 圃場から得られた単収曲線から予測単収値 U_{cut} を生成するアルゴリズムを以下に示す.

- STEP3.1 刈取時刻 t_{cut} を入力する. t_{cut} は刈取適期期間 t_{ship} , および, 圃場の刈取計画によって変化する.
- STEP3.2 t_{cut} を式(6)に代入することで刈取時刻における生育値 h_{cut} を求める.
- STEP3.3 圃場から得られた単収曲線, および, h_{cut} から予測単収値 U_{cut} を求める. 予測単収値 U_{cut} は式(8)によってあらわされる.

$$U_{cut}=Ah_{cut}^2+Bh_{cut}+C \quad (8)$$

STEP1 から STEP3 により予測生長曲線, 予測刈取適期期間, 予測単収値を算出する. 生長予測アルゴリズムをシミュレーションに実装することで, 生長期間と刈取量のばらつきにより発生する欠品, および, 優良ロスについて事前評価を行う.

5. ケーススタディ

提案するシミュレーション手法の妥当性を確認するためにケーススタディを行う. ケーススタディの目的を以下に示す.

- 目的 1 提案する生長予測アルゴリズムにより生成した予測生長曲線における生育の予測精度を検証する.
- 目的 2 提案する状態遷移モデルの動作確認を行い, シミュレーション手法を用いて欠品, および, 優良ロスを算出可能であることを検証する.

HATAKE カンパニーにおける圃場の調査から得られた春季(2 月 16 日から 6 月 14 日)におけるデータを入力条件としてシミュレーションの実行を行う. 入力条件を表 1 に示す. 本ケーススタディでは, 離散系事象シミュレーションである WITNESS (伊藤忠テクノソリューションズ, 2016), および, 拡張のための visual basic 言語を利用する.

K, b, c, A, B, C を求めるためのデータ数はそれぞれ, 1 日あたり 50 サンプルを 30 日分利用した.

Table 1 Input data for simulation.

Field parameters	Curing days [day]	10
	Planting area [m^2]	230
	Number of fields[house]	150
	Number of sowing [times / day]	5
	Reaping period [h]	2
	Shipment standard upper limit [cm]	5
	Shipment standard lower limit [cm]	8
	Scheduled reaping date [day]	18
	Demand amount [kg / day]	1867
Crop parameters	Growth value (average) at midpoint [cm]	4.68
	Growth value (standard deviation) at midpoint [cm]	0.58
	Number of days passed through the midpoint [day]	16
	K (average)	10.22
	K (standard deviation)	0.99
	b	1.5×10^3
	c	0.45
	A	0.052
	B	-0.12
	C	0.017

5・1 作物の生長予測アルゴリズムの精度検証

提案する生長予測アルゴリズムにより算出する生育値と単収値の予測精度の検証を行う. シミュレーション上で 1000 回播種を行い, 得られた生育値, および, 単収値について実測値と比較することで精度の検証を行う.

算出した生育値における平均値とそれらのばらつきの分布を図 9 に, 単収値における平均値とそれらのばらつきの分布を図 10 に示す. HATAKE カンパニーではベビーリーフの出荷基準を 5 cm から 8 cm と定めている. 平均生育値が出荷基準を満たしている期間とその前後 1 日である播種後 16 日目から 20 日目における生育値と単収値の誤差率を表 2 に示す. 実測生育値の近似値とシミュレーションから得られた予測生育値を比較した結果, 予測生育値の平均誤差率は-2.68 %, 標準偏差値は 5.84 %であった. また, 実測単収値と予測単収値を比較した結果,

単収値の平均誤差率は-7.17%, 標準偏差値は 1.65 %であった。ここで、誤差率のマイナスは、予測単収値が実測値よりも小さい事を示す。予測生育値, および, 予測単収値は精度良く算出できた。誤差が生じた理由として、実測生育値における標準偏差の推移が一定でなく、日毎の生育値の平均値がばらつくためであることが挙げられる。

Fig. 9 Leaf length of crop growth prediction algorithm. Fig. 10 Unit crop of crop growth prediction algorithm.

Table 2 Error rate of simulation.

Elapsed days after seedings	Leaf length		Unit crop	
	Error rate of average value	Error rate of standard deviation[%]	Error rate of average value	Error rate of standard deviation[%]
Day16	-1.68	1.22	-12.15	2.45
Day17	-1.28	3.18	-1.6	2.85
Day18	-2.99	6.79	-7.63	1.41
Day19	-3.7	8.8	-8.29	0.2
Day20	-3.72	9.23	-6.2	1.37
Average of error rate[%]	-2.68	5.84	-7.17	1.65

5・2 欠品, および, 優良ロスの評価

提案するシミュレーション手法を利用して、欠品, および, 優良ロス評価を実施した。入力条件を変動させてシミュレーションを実行し、欠品, および, 優良ロスに与える影響について評価した。播種回数の変動が欠品, および, 優良ロスに与える影響について評価を行う。入力条件は、圃場数以外は表 1 を利用する。圃場数を 100, 200 と変更した場合における、シミュレーションの出力結果をそれぞれ図 11, 図 12 に示す。また、出力結果におけるそれぞれの平均値, および, 標準偏差を、表 3, 表 4 に示す。

圃場数が 100 の場合において、1 日あたりの播種回数が 4 回の時点で、生産量が収束する。これは、周年多回転栽培では、播種日をずらしながら、複数圃場で栽培する必要があるが、1 日あたりの播種回数に対して、播種可能な圃場数が足りないことが原因である。つまり、圃場数 100 の場合、1 日あたりの播種回数が 4 回の時点で、圃場の稼働率が 100%に達した状態にある。そのため、これ以上播種回数を増やしても、生産量が増加せず、常に欠品が発生し、1 日あたりの播種回数が 4 回以降について生産量は収束する。優良ロスは、1 日あたりの播種回数に関わらず、発生しない。

圃場数が 200 の場合において、1 日あたりの播種回数が 7 回の時点で、生産量が需要を満たす。そのため、圃場数は需要に対して供給が可能な数に達していると言える。1 日あたりの播種回数が 7 回の時点で、欠品が収束し、優良ロスが発生しはじめる。1 日あたりの播種回数が 7 回以降は、欠品量は低く収束する。優良ロス量は、1 日あたりの播種回数が 8 回で収束する。これより、圃場数が 200 の場合の最適な 1 日あたりの播種回数は 7 回であると考えられる。この傾向は、実際の圃場と一致する。

Fig. 11 Transition of lack of stock and crop loss (Number of fields [house]: 100).

Table 3 Average and standard deviation of Crop amount (Number of fields [house]: 100).

Number of sowing	Production volume		Lack of stock		Crop loss	
	Average[kg]	Standard deviation[kg]	Average[kg]	Standard deviation[kg]	Average[kg]	Standard deviation[kg]
1	255.3	128.2	1609.4	139.6	0.0	0.0
2	505.6	188.6	1359.1	193.6	0.0	0.0
3	760.3	250.8	1104.5	252.4	0.0	0.0
4	907.4	377.0	957.7	376.4	0.3	7.9
5	910.9	577.4	955.6	574.3	1.8	14.9
6	914.4	732.6	961.7	716.1	11.3	45.7
7	925.3	846.5	971.3	805.7	31.9	73.9
8	936.5	855.0	962.3	812.2	34.1	75.9
9	940.2	832.4	956.4	791.3	31.8	76.9
10	942.9	795.7	949.9	757.7	28.0	75.2
11	942.8	762.3	947.1	727.1	25.1	69.1
12	944.3	761.8	945.2	727.0	24.7	70.0
13	944.6	764.1	946.8	726.3	26.6	76.4

Fig. 12 Transition of lack of stock and crop loss (Number of fields [house]: 200).

Table 4 Average and standard deviation of Crop amount (Number of fields [house]: 200).

Number of so	Production volume		Lack of stock		Crop loss	
	Average[kg]	Standard deviation[kg]	Average[kg]	Standard deviation[kg]	Average[kg]	Standard deviation[kg]
1	251.5	122.2	1613.3	134.1	0.0	0.0
2	509.3	187.6	1355.5	192.6	0.0	0.0
3	762.6	249.5	1102.2	251.0	0.0	0.0
4	1013.2	299.3	851.6	298.6	0.0	0.0
5	1268.1	360.4	597.7	356.4	1.0	13.1
6	1526.5	396.8	355.4	374.1	17.1	50.9
7	1983.8	432.5	86.8	341.7	353.4	418.6
8	2073.7	422.1	61.3	331.1	489.8	467.0
9	2082.9	422.3	60.7	330.8	495.2	436.7
10	2069.6	422.0	60.5	330.8	495.2	469.0
11	2075.8	425.1	60.5	330.8	498.3	467.9
12	2069.6	417.4	60.5	330.8	501.2	474.9
13	2074.7	421.8	60.5	330.8	503.6	483.7

6. 結 言

本研究では、農業生産システムにおける圃場での播種・刈取等の生産作業プロセス、および、生長の不確実性を考慮し、周年多回転栽培の作物における欠品、および、優良ロスの評価を実施するため、シミュレーション手法を開発した。まず、生産作業プロセス、および、作物の生長プロセスを調査した。IoTを利用して、ベビーリーフにおいて製品含有率の高い周年多回転栽培作物のピノグリーンを生産している圃場からデータを収集し、得られたデータから、播種後の経過時間と単収値、および、生育値の関係を明らかにした。これらの調査の結果から、圃場の生産作業プロセスのモデル化、および、作物の生長予測アルゴリズムを提案し、シミュレーションに実装した。ケーススタディにより、提案するシミュレーション手法の精度の検証を実施した。また、提案するシミュレーション手法を利用して、圃場数の変動を考慮する欠品、および、優良ロス評価を行い、シミュレーション手法の有効性を確認した。今後の課題として、シミュレーションを利用して、刈取のタイミングを早刈り、

遅刈り, それらのミックス等に変更した場合の, 欠品, および, 優良ロス削減のための管理手法の開発が挙げられる.

謝 辞

本研究活動の一部は栢森情報科学振興財団の研究助成金により実施した. ご支援に感謝申し上げます. (株) HATAKE カンパニー社の濱里亮平氏には, 圃場の調査に関して, 多面的にご協力いただきまして感謝申し上げます. 富士通エフサス (株) 社の野川洋氏, 末次修一郎氏には, IoT 関連技術の具体的・継続的なご指導・ご支援を頂き, 感謝申し上げます. 東京理科大学日比野研究室卒業生の松井敏浩君, 志水翔悟君の圃場の調査・分析の参加に感謝いたします.

文 献

- D'Agostino,R.B., Belanger,A. and D'Agostino,Jr.R.B., A Suggestion for Using Powerful and Informative Tests of Normality, The American Statistician, Vol.44, No.4(1990), pp.316-321.
- 駄田井久, 農産物直売所における消費者行動の実証的分析, 岡山大学農学部学術報告, Vol.93, No.1(2004), pp.77-81.
- 富士通エフサス, FUJITSU Intelligent Society Solution, 智の WA! , available from<<http://www.fujitsu.com/jp/group/fsas/solutions/business-technology/intelligent-society/chienowa/>>, (参照日 2016 年 5 月 25 日).
- (株) HATAKE カンパニー, HATAKE COMPANY, available from<<http://hatake.co.jp/>>, (参照日 2016 年 10 月 10 日).
- 星岳彦, 大畑亮輔, 渡邊勝吉, 上田正二郎, 南石晃明, 携帯電子機器によるワンストップ管理システム確立を目指した温室内環境確認のための URCS アプリケーションの施策, 農業情報研究, Vol.22, No.1 (2013), pp.193-200.
- 伊藤忠テクノソリューションズ株式会社,WITNESS,伊藤忠テクノソリューションズの科学・工学系情報サイト, available from<<http://www.engineering.eye.com/WITNESS/>>, (参照日 2016 年 6 月 20 日).
- 松田修三, 松原健太, 小沢和浩, ロジスティック関数を用いたイチゴの黄葉モデルの提案, 法政大学多摩研究報告, Vol. 26 (2011), pp. 21-25.
- 松倉誠一, 南石晃明, 藤井吉隆, 佐藤正衛, 長命洋佑, 宮住昌志, 大規模稲作経営における技術・技能向上及び規模拡大のコスト軽減効果, 農業情報研究, Vol.24, No.2(2015), pp.35-45.
- 三省堂編, 大辞林第三版(2006), p.1576.
- 佐藤賢一, 高橋武子, ロジスティック曲線による水稻の土壌窒素吸収量の推定, 日本土壌肥料学会誌, Vol. 73, No.3(2002), pp. 293-295.
- 高辻正基, 完全制御植物工場の現状, 植物環境工学, Vol.22, No.1(2010), pp.2-7.
- 高山弘太郎, 第 2 世代の SPA とその実装, 植物環境工学, Vol.25, No.4(2013), pp.165-174.
- 戸上崇, 伊藤良栄, 橋本篤, 亀岡孝治, 高品質ミカン生産を目的とするセンサーネットワークを利用した圃場環境計測, 農業情報研究, Vol.20, No.3(2011), pp.110-121.
- 土崎哲夫, ジュンサイの季節別茎伸長と成長曲線, 農業土木学会誌, Vol. 52, No.2 (2011), pp. 121-127.
- Zhang, Y., Wang, L. and Duan, Y., Agricultural information dissemination using ICTs: A review and analysis of information dissemination models in China, Information processing in agriculture, Vol.3, No.1(2016), pp.17-29.

References

- D'Agostino,R.B., Belanger,A. and D'Agostino,Jr.R.B., A Suggestion for Using Powerful and Informative Tests of Normality, The American Statistician, Vol.44, No.4(1990), pp.316-321.
- Datai,H., An analysis of Consumption at an Establishment for Direct Sales, Scientific reports of the Faculty of Agriculture, Okayama University, Vol.93, No.1(2004), pp.77-81(in Japanese).
- Fujitsu FSAS, FUJITSU Intelligent Society Solution, Mina no WA!, available from <<http://www.fujitsu.com/jp/group/fsas/solutions/business-technology/intelligent-society/chienowa/>>.

(accessed on May 25, 2016)(in Japanese).

HATAKE company , HATAKE COMPANY, available from <<http://hatake.co.jp/>>, (accessed on October 10, 2016) (in Japanese).

Hoshi,T., Ohata,R., Watanabe,K., Ueda,S. and Nanseki,T., Measures of URCS application for checking the environment in the greenhouse aiming to establish a one-stop management system by mobile electronic equipment, Agricultural Information Research, Vol.22, No.1, (2013) pp.193-200(in Japanese).

ITOCHU Techno-Solutions Corporation, WITNESS, engineering-eye, available from <<http://www.engineering-eye.com/WITNESS/>>, (accessed on June 20, 2016)(in Japanese).

Matsuda,S., Matsubara,K. and Ozawa,K., Proposal of model for Ginkgo's yellow leaves using the logistic function, Hosei University Tama Research Report, Vol. 26 (2011), pp. 21–25(in Japanese).

Matsukura,S.,Nanseki,T.,Fujii,Y.,Sato,M.,Chomei,Y. and Miyazumi,M.,Improvement of technology and skill in large-scale rice cultivation management and cost reduction effect of scale expansion,Agricultural Information Research, Vol.24, No.2(2015), pp.35-45(in Japanese).

Sanseido ed., Daijirin third edition(2006), p.1576(in Japanese).

Sato,K. and Takahashi,T., Estimation of Soil Nitrogen Absorption by Paddy Rice Using a Logistics Curve, Journal of the science of soil and manure, Vol. 73, No.3(2002), pp. 293-295(in Japanese).

Takatsuji,M., Present status of completely-controlled plant factory, Journal of Science and High Technology in Agriculture , Vol.22, No.1(2010), pp.2-7(in Japanese).

Takayama,K., Second generation speaking plant approach, Journal of Science and High Technology in Agriculture, Vol.25, No.4 (2013), pp.165-174(in Japanese).

Togami,T., Itoh,Y., Hashimoto,A. and Kameoka,K., Measurement of field environment using sensor network aimed at high quality mandarin orange production,Agricultural Information Research, Vol.20, No.3(2011), pp.110-121(in Japanese).

Tozaki,T., Seasonal stem growth and growth curve of water shield, Journal of Agricultural Engineering Society, Vol. 52, No.2(2011), pp. 121-127(in Japanese).

Zhang, Y., Wang, L. and Duan, Y., Agricultural information dissemination using ICTs: A review and analysis of information dissemination models in China, Information processing in agriculture, Vol.3, No.1(2016), pp.17-29.