

季節を考慮した農作物の生育予測手法の提案

Proposal of Crop Growth Forecast Model Considering Seasons

近年、農作物の契約出荷を行う農業法人が増加している。農作物の生育は季節や天候などさまざまな要因による影響を受けやすく、契約出荷を履行できるよう計画的に農作物を生育することは難しい。本稿では契約出荷される農作物の計画生産を支援するための生育予測手法を提案する。本手法では季節による農作物の生育の仕方の違いを考慮できるよう季節ごとに予測モデルの係数を推定する。農業法人でのハウス栽培ミズナの栽培実績データ 1 年分を用いて、収穫予定日の 10 日前を起点として収穫日の草丈長さと出荷ケース数の予測精度を求めた結果、農業法人が実用上必要な精度で草丈長さと出荷ケース数を推定できることが分かった。また季節の違いごとに生育予測モデルの係数を推定することで予測精度が有意な水準で改善することも分かった。

菊地 大介 Kikuchi Daisuke
飯塚 新司 Iizuka Shinji
手塚 大 Tezuka Masaru
齋藤 邦夫 Saito Kunio

1. はじめに

近年、農作物の契約栽培を行う農業法人が増加している¹⁾。契約栽培では小売業者や流通業者との間で定めた出荷日や出荷数量、価格などに関する契約に基づいて農作物を生産する。この活動を計画的に実施することで、生産者は安定した農業経営を継続できる。

しかし農作物の生育は季節や天候などさまざまな要因による影響を受けやすい。そのため契約出荷日に所定の数量および品質の農作物を出荷できるように日々適切に生育管理することは容易ではない。

また多くの生産者は過去の経験などにに基づき農作物の生育管理を行っている。そのため経験が少ない農業従事者が農作物の栽培作業計画を適切に立案および実施することも困難である。

近頃、農作物の計画生産に関わるこれらの問題の解決を目的とした生育管理システムに注目が集まっている。IT を用いて農作物の栽培実績データの収集・記録・分析を行い、得られた知見を今後の生育管理に活用できる。

農作物の生育管理システムに必要な技術として生育予測技術および栽培作業計画の最適化技術がある。栽培作業計画を策定する上で日々作付ごとの収穫適正時期や収穫見込み重量を予測することが必要である。そのため本研究では実用上十分な精度を持つ農作物の生育予測手法の確立から着手した。

2. 生育予測技術の課題

2.1 生育予測モデルの係数推定の課題

農作物の収穫時期や収穫量を推定するためのさまざまな生育予測技術が考案されている。代表的な生育予測手法として、有効積算気温法^{2,3)}や DVR 法⁴⁾、相対成長率法^{5,6)}などがある。

既存の生育予測手法は大規模な圃場で年 1 回栽培される水稲や小麦などの穀物類を対象としたものが主流である。試験的に少しずつ環境条件を変えて栽培を行って生育予測モデルの係数を推定する場合が多い。

またこれらの技術では各圃場に設置された多数の温度計や専用のセンサ類および衛星画像解析で得たデータなどを生育予測モデルのパラメータとして用いる。多数のセンサを配置する必要があるために初期投資および管理コストが高くつき、中小規模の農業法人ではコスト的な面から適用がしにくい。

さらに相対成長率法に基づくコマツナの葉面積の生育予測モデル⁵⁾では地温をパラメータとしている。地温を測定するためには専用の測定機器が必要となり、経営コストの増大となる。

2.2 年に複数回収穫可能な農作物栽培での課題

ミズナやコマツナなどの葉物野菜のように、生育期間の短い農作物は年に複数回収穫される。このような場合、日射量や降雨量および気温が農作物の生育に与える影響

が寒冷期と温暖期とで大きく異なる。しかし従来の生育予測手法では季節性が考慮されていなかった^{5,6)}。

3. 生育予測手法の構築

一般的に農作物の収穫時期は株の草丈長さや重量、葉の面積や厚さ、果実の直径や色の濃さなどさまざまな指標を用いて推定できる。また農作物の収穫量は株や果実などの重量や体積、個数などの指標を用いて推定できる。

例えば葉物野菜では収穫時期は草丈長さで決まり、収穫量は出荷ケース数で測定されることが多い。果実などでは収穫時期、収穫量ともに果実の重量で決まる。

本研究ではミズナやコマツナなどの葉物野菜を対象として、収穫時期を草丈長さから予測するための手法を構築した。また収穫量を出荷ケース数単位で予測する手法も考案した。

3.1 収穫時期予測モデル

本研究では相対成長率法に基づく生育予測モデル⁷⁾を用いて日々の生育度を推定する。生育度とは農作物の生育度合いを表す指標である。今回はミズナなどの葉物野菜を対象とするため草丈長さを用いる。

本モデルでは農作物の生育度の翌日にかけての相対成長率が現在の生育度および外気温度や日照時間などのパラメータによって決まるとする。これは同じく相対成長率法に基づくコマツナの葉面積の生育予測モデル⁵⁾を改良したものである。翌日にかけての生育度の相対成長率を求める成長関数 h は次の式(1)で表される。ここで L_n は生育 n 日目の生育度、 T_S は地温、 F は定数、 a, b, c, g, k は係数である。また e は自然対数の底である。

$$h(L_n, T_{S,n}) = \frac{a(b - L_n^F)}{1 + ce^{-kT_{S,n}}} - g \quad \dots (1)$$

一方、本稿で提案する生育予測モデルの成長関数 h' は式(2)で表される。ここで L_n は n 日目の生育度、 $\vec{\theta}_n$ はパラメータ、 a, m, f, g, \vec{k} は係数である。 $\vec{k} \cdot \vec{\theta}_n$ は内積を表す。

$$h'(L_n, \vec{\theta}_n) = \frac{a \left(1 - \left(\frac{L_n}{m} \right)^f \right)}{1 + e^{-\vec{k} \cdot \vec{\theta}_n}} - g \quad \dots (2)$$

$$\vec{\theta}_n = (T_{A,n}, S_n)$$

パラメータには気象条件を表す外気温度 T_A と日射量 S の二つを用いる。外気温度と日照時間は地温と相関があると考えられるため、地温に代わるパラメータとしてこれらを用いることは適切である。外気温度と日照時間のデータは一般の気象情報提供サービスや(財)気象業務支

援センター⁸⁾などを通じて入手できる。これらのデータを用いることでコマツナの葉面積の生育予測モデル⁵⁾で必要であった地温計などの専用の計測機器が不要となる。

なお式(2)での係数 m は農作物の標準的な最大生育度に相当する。生育度の成長因子を $a(1 - (L_n/m)^f)$ と正規化することで式(1)のモデルでは従属性があった係数間の独立性を高めている。これにより、生育予測モデルの係数推定の安定性を高めている。

3.2 収穫量予測モデル

農作物の収穫量の指標としてコンテナ数やケース数および重量などがある。本稿では契約出荷の単位であるケース数の予測モデルを提案する。

農作物の出荷ケース数の予測はべき乗モデル⁹⁾で行う。本モデルでは収穫日の草丈長さの予測値 L と出荷ケース数 C が式(3)に示すようにべき乗の関係にあるとする。ここで a と k は係数である。

$$C = aL^k \quad \dots \dots (3)$$

3.3 季節を考慮した係数推定

本稿で提案する生育予測手法では年に複数回収穫される農作物での予測精度向上を図るため、季節ごとに予測モデルの係数推定を行う。これは季節によって変わる日射量や降雨量および気温が農作物の生育に与える影響を考慮できるようにするためである。

過去の栽培実績データを用いて生育予測モデルの係数を推定する際、季節ごとに学習用データを区分する。この季節区分はさまざまな方式で行える。例えば季節によって大きく変わる農作物の生育日数を基準として、3ヵ月などの一定期間ごとに季節を割り当てる方法⁷⁾などが考えられる。

4. 実データを用いた評価

ハウス栽培ミズナの契約栽培を行う農業法人での栽培実績データ1年分を用いて、収穫日の草丈長さおよび出荷ケース数の予測精度を求める評価実験を行った。

4.1 実験方法

東北地方でミズナの通年ハウス栽培を行う農業法人へのヒアリングを踏まえ決定した評価実験の設定を表1にまとめる。

表 1 評価実験の設定

実験方法	10 区分の交差検証
データ期間	収穫日が 2010 年 11 月～2011 年 12 月
対象作付数	209 (全作付数 : 271)
季節区分	収穫予定日が 3～5 月, 6～8 月, 9～11 月, 12～2 月の 4 区分
予測対象	収穫予定日 10 日前を予測起点日とした, 収穫日の草丈長さとお出荷ケース数
評価指標	草丈長さとお出荷ケース数の予測誤差 (予測誤差 = 予測値 - 実績値)

評価実験は農業法人の作業実績記録をもとに作成したデータを用いて、10 区分の交差検証を行った。

本実験で用いた栽培作業実績データは日次データと作付データから構成される。日次データは各圃場での作付開始日から収穫日までの各日付での、ミズナの草丈長さを記した生育データと外気温度や日照時間などが記された気象データから構成される。作付データは各作付での生育日数や収穫ケース数などの収穫実績の記録である。

使用したデータの期間は収穫日が 2010 年 11 月から 2011 年 12 月までの約 1 年間である。全体の作付数は 271 作付であるが、本実験ではそのうち 209 作付を用いた。これは病害や立ち枯れなどの発生により栽培に失敗して出荷重量が 250kg 以下となった作付および出荷ケース数が記録されていない作付を除外したためである。

農業法人での過去の栽培経験をもとに、季節によるカテゴリは 3 月から 5 月まで、6 月から 8 月まで、9 月から 11 月まで、12 月から 2 月までの四つに区分した。

予測精度の評価実験は以下の手順で行った。

- (1) すべての作付データをカテゴリごとに区分する。
- (2) カテゴリごとに 10% の予測対象データをランダムに選び、残り 90% のデータを学習用データとして生育予測モデルの係数を推定する。
- (3) この農業法人では各作付で 10 日間前後の生育見積もりを行っているという実態に合わせて、収穫予定日の 10 日前を予測起点日として、生育予測モデルを用いて収穫予定日の草丈長さとお出荷ケース数を推定する。
- (4) (2) と (3) の手続きを各カテゴリで予測対象データの重複がないように計 10 回行う。
- (5) 予測値と実績値の差を予測誤差として集計し、その平均絶対値を求める。また予測誤差の度数折れ線グラフを作成してその分布を確認する。

実務上の要求水準として草丈長さの予測誤差の絶対値が 5cm 以内となった場合に予測成功と設定した。これは出荷標準となるミズナの草丈長さ 45cm に対して 40cm

から 50cm までの範囲内であれば出荷可能であるという実態に沿ったものである。また出荷ケース数の要求水準として、契約上の予定出荷量に対して 15 ケース以上不足しなかった場合を予測成功と設定した。これはこの農業法人の年間栽培での 1 回の作付での収穫ケース数の平均値 150 に対して、その 10% にあたる 15 ケース分をバッファとして見込んでいるためである。予測誤差により生じる出荷ケース数の不足分がこの範囲内であれば同時期に栽培している他の圃場から融通が利くとしている。なお実績値が予測値を上回った場合、過剰分は市場出荷するため農業経営上は問題とならない。この場合は不足量 0 とした。

4.2 結果と考察

草丈長さの予測誤差の要約を表 2 に、出荷ケース数の不足量の要約を表 3 に示す。それぞれの場合の予測誤差の度数折れ線グラフを図 1 および図 2 に示す。

表 2 草丈長さの予測誤差の要約表

季節によるデータ区分	なし	あり
誤差絶対値 5cm 以上の作付 [%]	5.3	3.4
予測誤差の平均絶対値 [cm]	2.1	1.7

表 3 出荷ケース数の不足量の要約表

季節によるデータ区分	なし	あり
15 ケース以上不足する作付 [%]	33.5	25.8
不足量の平均絶対値 [ケース]	15.0	9.7

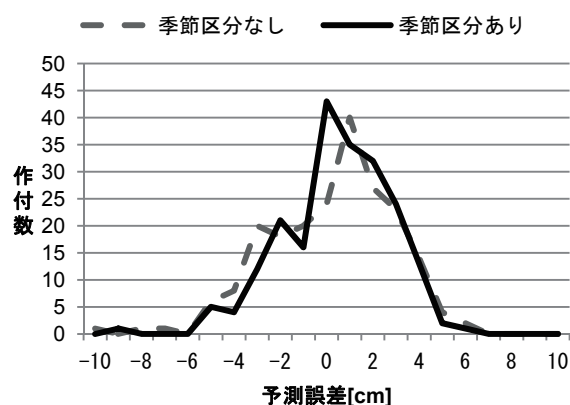


図 1 草丈長さの予測誤差の度数折れ線グラフ

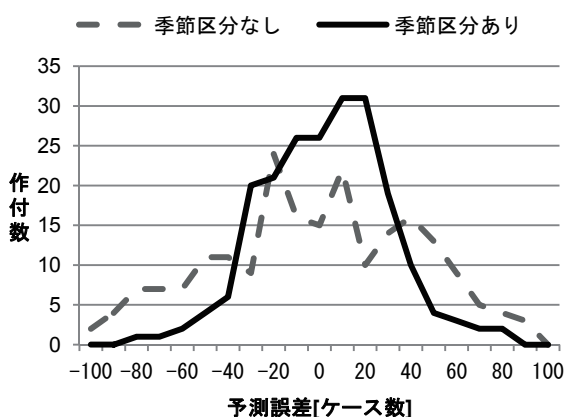


図 2 出荷ケース数の予測誤差の度数折れ線グラフ

草丈長さの予測誤差の絶対値が 5cm 以上となる作付数の全体での割合は、季節を考慮した場合に 3%、考慮しなかった場合に 5%程度となった。両方の場合で、約 95%の作付での予測誤差が実務上の許容範囲である 5cm 以内となった。したがって本稿で提案する予測モデルを用いて、10 日前時点で収穫日の草丈長さが実用上十分な精度で推定できると言えるが、季節を考慮することでさらに数作付分だけ予測成功作付を増やすこともできた。

一方、出荷ケース数の実績値が予測値よりも 15 ケース以上不足する作付数の全体での割合は季節を考慮して予測モデルの係数を推定した場合に 26%、それを行わない場合に 34%程度となった。この結果は単一圃場での数値である。実際には農業法人は複数の圃場を持ち、保有する圃場全体の生育予測をもとに、複数圃場を組み合わせた収穫計画を立てることで、直近の出荷量の確保と将来の生育計画の調整を行っている。このような全体の調整を考慮すると、複数の圃場を組み合わせることによる誤差の低減と、次回以降の出荷の生産量調整を組み合わせることができるため、十分な予測精度と言える。評価実験のデータを提供いただいた農業法人からも今回の収穫量予測の精度が実運用上十分であると評価いただいた。

なお季節を考慮した収穫量予測では出荷ケース数の不足量の平均絶対値が 9.7 となり、元々想定していたバッファ量である 15 ケースよりも大きく改善できている。したがって季節の考慮が欠品リスクの減少などの経済効果につながると言える。

また、予測誤差の平均絶対値について t 検定を行った結果、季節の考慮により有意水準 1% で草丈長さおよび出荷ケース数の予測誤差の平均絶対値が減少したと言える。したがって季節を考慮して予測モデルの係数を推定する

ことで、それを考慮しない場合と比べて草丈長さとお荷ケース数の予測精度が有意な水準で改善できると言える。

5. おわりに

本稿では契約栽培される農作物の計画生産を支援するための生育予測手法を提案した。

本手法は季節の違いが農作物の生育に与える影響を考慮し、季節ごとに過去実績データを区分して生育予測モデルの係数を推定する。これにより季節に合った精度のよい生育予測ができる。より適切な気象区分およびその自動化の方法については今後の検討課題とする。

また専用の機器を使わずに容易に測定および入手できる外気温度や日照時間、草丈長さのデータを用いて実務上十分な精度で生育予測ができる。これにより従来手法と比べて低コストで生育予測技術を適用できる。

本手法を活用することで農作物の生育不足や収穫量不足により契約出荷を履行できないリスクを低減できる。それにより栽培計画や出荷計画の変更に伴う余剰コストの発生や販売機会の損失を抑止する効果が期待できる。

なお本手法は単一圃場で日々の農作物の生育予測を行い収穫時期や収穫量を見積もるためのものである。したがって実際の農業法人で活用するためには複数圃場での農作物の栽培作業計画の最適化技術も確立する必要がある。従来の農業法人で行われてきた人手での見積もりとの比較評価も含め、これは今後の課題とする。

参考文献

- 1) 小野沢康晴：野菜流通における契約出荷と市場出荷，農林金融 28, pp.584-603 (2004)
- 2) 小林雅昭：秋作メロン後作ミズナの生育・収量予測と作付計画及び経営規模決定プログラムへの応用，平成 19 年度諫早湾干拓営農対策試験成績書
- 3) 岩田文男，大久保隆弘：とうもろこしの生育に関する生理生態的研究：第 1 報 生育期間の有効積算温度の一定性，日本作物学会紀事 38(1), pp.91-94 (1969)
- 4) 堀江武，中川博視：イネの発育過程のモデル化と予測に関する研究：第 1 報 モデルの基本構造とパラメータの推定法および出穂予測への適用，日本作物学会紀事 59(4), pp.687-695 (1990)
- 5) 濱寄孝弘，岡田益己：べたがけに伴う温度変化とコマツナの生長との関係の簡易モデルによる解析，農業気象 59(4), pp.287-296 (2003)
- 6) 北海道農業研究センター：寒締めハウレンソウの栽培

支援に有効な地温-生育モデル,

<http://www.naro.affrc.go.jp/project/results/laboratory/harc/2005/cryo05-31.html> (accessed: 2012/10/10)

7) 菊地大介, 飯塚新司, 齋藤邦夫, 手塚大: 作業計画をパラメータに組み込んだ相対成長率法によるハウス栽培ミズナの生育予測モデル, 情報処理学会 第 74 回全国大会, pp.285-286 (2012)

8) 一般財団法人 気象業務支援センター,

<http://www.jmbse.or.jp/> (accessed: 2012/10/10)

9) J.H.M. Thornley, J. France : *Mathematical Models in Agriculture, Quantitative Methods for the Plant, Animal and Ecological Sciences*, 2nd Edition, CABI (2007)



菊地 大介 2009 年入社
事業企画開発本部 研究開発部
農作物生育管理技術, スマートデバイス活用アプリケーションの研究開発
daisuke.kikuchi.01@hitachi-to.co.jp



飯塚 新司 2008 年入社
事業企画開発本部 研究開発部
農作物生育管理技術, 医療データ分析技術の研究開発
shinji.iizuka.01@hitachi-to.co.jp



手塚 大 1994 年入社
事業企画開発本部 研究開発部
意思決定, リスク分析, 最適化技術の研究開発
tezuka@hitachi-to.co.jp



齋藤 邦夫 1992 年入社
事業企画開発本部 企画グループ
事業・研究戦略の立案と推進
kuni@hitachi-to.co.jp