

植物工場におけるルッコラ栽培の背丈経日変化に関する多変量解析

竹内 智晴[†] 馬場 昭宏[†] 永嶋 規充[†]
三菱電機株式会社 情報技術総合研究所[†]

1 背景

ビニールハウス等の温室を活用した施設園芸において、空調や灌水設備などの機器を配備することで、施設内の栽培環境の機械制御を可能とした施設園芸が年々増加している。このような園芸施設は、太陽光利用型植物工場とも呼ばれている[1][2]。

農家では、出荷計画に沿った安定的な農作物の生産を目指している。そのため、太陽光型植物工場において、最適環境維持のため、空調や天窓等の機器を制御する環境制御システムが必要とされる。

最適な環境制御を実現する方法として、植物生長と栽培環境の関係性をモデル化(生長モデル)することにより、環境の変化によって期待される植物生長への効果を算出して、制御にフィードバックする方法が考えられる。この生長モデルを活用すれば、植物の生長予測を行うことが可能となる。そのため、例えば、将来の天候不順などによる環境変化が原因で植物生長が計画からずれる場合に、発生前にその生長ずれ検知し、ピンポイントで環境制御して生長ずれを未然に防ぐといった、より効率的な環境制御が実現可能となる。

本稿では、植物工場の環境制御の実現に向け、太陽光型植物工場での主要作物の一つであるルッコラの水耕栽培データを対象に多変量解析を行い、最適な生長モデルについて検討した内容について述べる。

2 植物生長と栽培環境の関係

植物生長には日射や気温などの複数の環境因子が影響しており、それらは複雑に関係している。複数の環境因子の作物生長への総合的な影響の解析について、例えば、重回帰分析による解析アプローチがある[3]。[3]では、様々な環境因子のなかで、昼および夜の気温、定植後経過日数がレタス生体重経日変化に大きく影響していること、重回帰式からレタス生体重を予測できることが報告されている。

一方で、植物生長は、ロジスティック曲線のような曲線で表現することができ、また、生育の初期段階においては指数関数でも近似可能であると言われている[4]。そのため、[3]のように重回帰分析による解析アプ

ローチをとり、ロジスティック曲線の様な曲線に回帰させることで、植物生長をより高精度にモデル化することができると考えられる。

そこで、ルッコラの水耕栽培データに対して重回帰分析を行い、生長モデルの構築と、作物生長と栽培環境の関係分析を行った。生長データの観測項目は表 1、栽培環境データの観測項目は表 2の通りとし、播種から収穫まで計 15 回分の生育データを観測した。

3 回帰による生長モデルの構築

前記観測データを用いて、式(1)に基づくロジスティック回帰分析を行い、生長モデルを生成した。

$$\begin{cases} y(i) = \frac{K}{a + b \exp(X(i))} \\ X(i) = \gamma_0 + \gamma_1 x_1(i) + \gamma_2 x_2(i) + \dots + \gamma_n x_n(i) + \varepsilon_i \end{cases} \quad (1)$$

ここで、添字 i は播種からの日数を示し、説明変数 $x_n(i)$ は、表 2の日射強度、日長、室内気温(朝、昼、夕、夜)、室内湿度(朝、昼、夕、夜)、室内 CO2 濃度(朝、昼、夕、夜)、養液水温(朝、昼、夕、夜)の 18 項目について、日毎の播種日からの観測データの累積値を与え、目的変数 $y_n(i)$ は、表 1のルッコラの日毎の背丈を与えた。

また、同データにより、式(2)に基づく重回帰、式(3)に基づく指数関数回帰を行い、同様に生長モデルを生成した。

$$y(i) = \beta_0 + \beta_1 x_1(i) + \beta_2 x_2(i) + \dots + \beta_n x_n(i) + \varepsilon_i \quad (2)$$

$$\begin{cases} y(i) = a \exp(X(i)) \\ X(i) = \gamma_0 + \gamma_1 x_1(i) + \gamma_2 x_2(i) + \dots + \gamma_n x_n(i) + \varepsilon_i \end{cases} \quad (3)$$

表 1 ルッコラ生育データ観測項目

項目	単位	測定間隔	備考
背丈	cm	1日毎	垂れた葉を起こし、床からの垂直背丈を測定

表 2 栽培環境データ観測項目

項目	単位	測定間隔	備考
日射強度	kW/m ²	10分毎	解析には、日毎の播種日からの累積値を使用
日長	秒		
室内気温	°C	10分毎	解析には、朝(5:00-10:00)、昼(10:00-15:00)、夕(15:00-19:00)、夜(19:00-24:00、0:00-5:00)に分割し、日毎の各時間帯でそれぞれ播種日からの累積値を使用
室内湿度	%RH		
室内 CO2 濃度	ppm		
養液水温	°C		

Multivariate Analysis on Time Course of Arugula Stature Growth in a Plant Factory
Tomoharu TAKEUCHI[†], Akihiro BABA[†] and Norimitsu NAGASHIMA[†]
[†]Information Technology R&D Center, Mitsubishi Electric Corporation

表 3 回帰による生長予測モデルの比較

	ロジスティック回帰モデル	重回帰モデル	指数関数回帰モデル
予測精度	○ 予測精度は安定	△ 生育回ごと予測精度がばらつく	○ 予測精度は安定
構築容易性	○ 別途生長量の飽和値設定が必要	× 生育段階を分割し、段階ごとモデル生成が必要	○ 必要な設定は特になし
適用範囲	○ 同様の生成法により様々な作物に対応可能	○ 同様の生成法により様々な作物に対応可能	△ 生育初期で収穫する作物のみ対応可能
周年利用性	○ 生育回に無関係に同一モデルを利用可能	△ 生育回(季節)ごとにモデル調整が必要	○ 生育回に無関係に同一モデルを利用可能
環境制御システムへの適用可能性	○	×	△

4 生長予測結果の生長モデル比較

評価では、生長モデルによる生長予測値を算出し、生長実績値との比較を行った。モデル生成に用いたルッコラ生育 15 回と同時期の環境データを入力として背丈生長の予測値を算出し、対応する生長実績値と比較することで、モデルごとの予測の精度や特徴について比較評価した。

表 3 に比較結果をまとめた。ロジスティック回帰による生長モデルは、各生育回の誤差量平均値について、15 回分を平均すると 0.63cm であった。また、各生育回の最大誤差量が平均 1.47cm であり、実績から大きく外れない範囲で生長を予測できていた。また、ロジスティック回帰モデルはモデル構築が比較的簡易で、生育回によらず予測精度も安定していた。一方、重回帰による生長モデルは、生育回により予測精度にばらつきが見られた。また、重回帰モデルは直線回帰のため、正確に生長予測するには生育段階を細かく分割し、段階ごとにモデルを生成する必要がある。指数関数回帰による生長モデルは、予測精度はロジスティック回帰モデルと同様安定していた。しかし、生長の飽和点が設定できないため、生育初期で収穫するベビーリーフなどに適用範囲が限られると考えられる。

以上より、ロジスティック回帰による生長モデルが、予測精度の安定性やモデル構築の容易性、適用範囲などで総合的に良好なモデルである結果が得られた。したがって、ロジスティック回帰モデルが植物工場の環境制御システムの適用に最も適していると考えられる。

5 植物生長と栽培環境の関係

ロジスティック回帰モデルを用いて、植物生長と栽培環境の関係解析を行った。その結果、各環境因子に対して、表 4 の結果が得られた。表 4 より、ルッコラ

の生長に最も強く相関しているのは日射強度であり、次に室内気温が強く相関していることが確認された。このことから、これらの因子は生長への影響度が高いと考えられる。また、室内 CO₂ 濃度は光合成が行われる昼間の方が夜間より生長との相関が強く、影響度が時間帯ごとに変化する様子が確認された。

表 4 ロジスティック回帰分析結果

説明変数	偏回帰係数(β)	標準誤差	z 値	Pr(> z)
日射強度	-2.58E-03	3.42E-02	-0.075	0.94
日長	1.82E-06	9.06E-06	0.201	0.841
室内気温(朝)	-3.13E-04	1.74E-03	-0.18	0.857
室内気温(昼)	3.42E-04	1.90E-03	0.17	0.865
室内気温(夕)	3.42E-04	3.28E-03	0.105	0.917
室内気温(夜)	4.84E-05	1.61E-03	0.045	0.946
室内湿度(朝)	-2.42E-05	4.99E-04	-0.048	0.916
室内湿度(昼)	-3.08E-06	2.85E-04	-0.011	0.991
室内湿度(夕)	-1.13E-05	5.85E-04	-0.019	0.985
室内湿度(夜)	1.07E-05	2.29E-04	0.047	0.963
室内 CO ₂ 濃度(朝)	-5.04E-07	1.56E-05	-0.032	0.974
室内 CO ₂ 濃度(昼)	1.47E-06	1.32E-05	0.111	0.911
室内 CO ₂ 濃度(夕)	-1.05E-06	1.80E-05	-0.059	0.953
室内 CO ₂ 濃度(夜)	-4.91E-08	7.94E-06	-0.006	0.995
養液水温(朝)	4.07E-04	3.35E-03	0.122	0.903
養液水温(昼)	-9.91E-05	2.94E-03	-0.034	0.973
養液水温(夕)	-6.49E-04	5.09E-03	-0.128	0.898
養液水温(夜)	-4.57E-05	1.11E-03	-0.041	0.967

6 まとめ

植物工場の環境制御の実現に向け、ルッコラの水耕栽培データを対象に多変量解析を行い、生長モデルの構築と、作物生長と栽培環境の関係解析を行った。その結果、ロジスティック回帰による生長モデルが、予測精度の安定性や適用範囲など総合的に良好な結果を得た。また、ルッコラ生長において、日射強度や室内気温は生長への影響度が高く、室内 CO₂ 濃度は昼間と夜間で生長への影響度が変化する事が確認された。

本結果は、環境制御システムで植物生長をコントロールするために操作すべき環境因子の判断に有意義な結果であると考えられる。ただし、植物工場の環境制御システムを実際に構築するにあたっては、本結果に加え、対コストや生産目標などから総合的に判断して制御値を決定していく枠組みが必要であると考えられる。

参考文献

- [1] 池田英男, “植物工場の現状と展望,” 農商工連携研究会植物工場ワーキンググループ (第1回), 2009
- [2] 古在豊樹, “太陽光型植物工場,” エネルギー・資源, 33(4), pp.183-186, 2009
- [3] 伊藤博通他, “植物工場におけるレタス成長の解析—レタス生体重経日変化の多変量解析—,” 植物工場学会誌, 11(1), pp.50-58, 1999
- [4] 高辻正基, “図解よくわかる植物工場,” 日刊工業新聞社, 2010