

施設園芸における栽培環境最適化に向けた
トマト生長のモデル化に関する検討
A Study on Modeling of Tomato Growth
for Optimizing Cultivation Environment in Green House

竹内 智晴[†] 鶴 薫[†] 福田 直也[‡]
Tomoharu Takeuchi Kaoru Tsuru Naoya Fukuda

1. はじめに

ビニールハウスやガラス温室などに代表される施設園芸では、リーフレタス等の葉菜類、トマトやイチゴ等の果菜類をはじめ、様々な野菜類が栽培されている。近年の施設園芸では、天窗/側窓、遮光カーテン、ヒートポンプ、ファン、CO₂発生器、灌水装置といった複数の機器を統合制御することにより、栽培環境の最適化を行っている。環境制御を機械化することにより、農作業の省力化(省人化)が見込まれる他、野菜の収穫時期や収量、品質の安定化効果が期待される。そのため、計画的な農業経営や農業の大規模化を目指す農業法人から特に高い関心を集めている。

2. 施設環境制御

施設園芸における環境制御は、作物栽培に適した温室内環境を制御・維持することが目的である。ただし、その制御方針は、対象作物によって大きく異なる。

2.1 野菜生長に即した環境制御

葉菜類は、定植から収穫まで株生長が単純であり、また定植から収穫まで一様な管理方法で栽培されている。そのため、葉菜類は施設内の制御設定値を一度設定すれば継続的な栽培・収穫が可能である。一方、果菜類は、定植後ある程度までは株生長が進むが、途中から収穫対象である果実の結実・肥大が始まるような比較的複雑な生長過程を踏む。そのため、果菜類の栽培では、生長度合いに応じた環境最適化が必要となる。現在実用化されている環境制御システムは、そのほとんどが手動での閾値設定による自動制御である。そのため、生長過程が複雑な果菜類を栽培する際は、栽培者が定期的に生長程度を確認し、適宜制御設定値を見直しているのが現状である。

したがって、果菜類栽培において定植から収穫までの環境制御を自動化するには、作物生長を自動で監視・予測する技術と環境制御技術との連携が必要であると考えられる。そこで著者らは、施設園芸における栽培環境制御のための野菜(果菜類)のモデル化技術について研究を行っている。

2.2 野菜生長のモデル化に関する先行研究

葉菜類を対象にした野菜生長のモデル化に関して、ルッコラ(ベビーリーフ)を対象にした研究がある[1]。[1]では、線形回帰を用いて、環境データ(気温、相対湿度、日射強度、CO₂濃度など)を元にルッコラの草丈生長を予測するモデルが提案されている。

一方、果菜類を対象にしたモデル化研究については、例えばトマトでは、植物生理に基づき、ある環境条件下での栽培におけるポテンシャル収量を予測可能なモデル[3]や、積算日射量から出荷量を予測するモデル[4]などが提案されている。

2.3 果菜類のモデル化における課題

[1]のようにモデル化対象が葉菜類の場合は、定植から収穫までの生長過程も栽培方法も一様なため、単一の統計モデルの当てはめで、ある程度の予測が可能となると考えられる。一方果菜類は、葉や茎の生長から果実肥大に移行するといった生育ステージの違いに加え、摘葉や摘花、灌水量調節などの人為作業(栽培ノウハウ)の存在により、定植から収穫までの一連の生長に対して単純な統計モデルを当てはめることは困難と考えられる[2]。

また、[4]のモデルは積算日射量のみを考慮したモデルだが、[5][6]によれば、気温やCO₂濃度がトマト果実の肥大や収量に影響する可能性を示唆しており、複数環境因子の影響を総合して考慮・モデル化すべきとも考えられる。

そこで本稿では、施設園芸におけるトマト栽培を対象とした栽培実験を行い、複数環境因子とトマト生長との関係解析を実施した。また、解析結果をもとに、複数環境因子を考慮したトマト生長のモデル化方式について検討した。

3. 栽培実験

本実験は、筑波大学農林技術センター内のビニールハウスにおいて、表1に示す条件でトマトを栽培し、トマト栽培データの収集と分析を実施した。本実験では、表2に示す環境データ、表3に示す生長データを計測した。

表1 本実験に係るトマト栽培条件

項目	内容	備考
対象品種	‘レバンソ’	西洋品種、中玉
栽培期間	2017/5-2017/8	
環境データ計測期間	2017/6/17-2017/8/22	解析対象期間に相当
栽培方法	低段密植栽培	栽植密度は6株/m ² 、2017/7/24以降順次摘心(花房は7~8段程度)
計測株数	36株	

表2 環境データ計測項目

環境因子	計測単位	計測間隔
温度	℃	30s 毎
相対湿度	%RH	30s 毎
照度	lux	30s 毎
CO ₂ 濃度	ppm	1s 毎

[†] 三菱電機 情報技術総合研究所 Information Technology R&D Center, Mitsubishi Electric Corporation

[‡] 筑波大学 生命環境系 Faculty of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba

表 3 生長データ計測項目

生長因子	計測単位	計測間隔
草丈	cm	週 1 回
節数	節	週 1 回
葉長	cm	週 1 回
葉幅	cm	週 1 回
開花日	日付	発生日
収穫開始日	日付	発生日
収穫重量	g/株	発生日
収穫個数	個/株	発生日

表 4 重回帰分析結果 (草丈)

因子	偏回帰係数	標準誤差	t 統計量	p 値
	15.91	0.87	18.28	0.00
気温(1)	98.50	109.87	0.90	0.37
気温(2)	-9.29	84.93	-0.11	0.91
気温(3)	121.80	158.00	0.77	0.44
気温(4)	-215.12	198.43	-1.08	0.28
湿度(1)	98.50	146.38	0.67	0.50
湿度(2)	-73.56	63.54	-1.16	0.25
湿度(3)	41.52	49.93	0.83	0.41
湿度(4)	-54.26	79.70	-0.68	0.50
照度(1)	-11.67	21.21	-0.55	0.58
照度(2)	12.79	18.55	0.69	0.49
照度(3)	21.04	14.55	1.45	0.15
照度(4)	-23.46	19.92	-1.18	0.24
CO ₂ (1)	-2.55	28.32	-0.09	0.93
CO ₂ (2)	40.47	47.28	0.86	0.39
CO ₂ (3)	-34.92	48.86	-0.71	0.48
CO ₂ (4)	-18.47	29.08	-0.64	0.53

3.1 トマト栽培データの解析

収集したトマト栽培データに対し、重回帰分析によりトマト生長と栽培環境との関係解析を実施した。本解析では、環境因子の時間帯別の影響度を考察するため、(1)0:00-6:00、(2)6:00-12:00、(3)12:00-18:00、(4)18:00-24:00 の 4 つの時間帯で各環境データを分割し、計 16 の環境因子を説明変数として重回帰分析を適用した。また、各環境データは累積値に変換した上で標準化 (平均 0、分散 1) を施した。

3.2 トマト生長データと環境因子の重回帰分析結果

表 4 に、トマトの草丈生長と各環境因子との重回帰分析結果を示す。ここでは、目的変数を計測期間における草丈生長の計測回間の差分とし、説明変数を各環境データの計測回間の累積値とした。このとき、草丈データは摘心されて草丈身長が止まるまでの期間を解析対象とした。表 5 に、トマトの開花と各環境因子との重回帰分析結果を示す。ここでは、目的変数を各日の株別の全花房の開花状況を開花段数として変換した値とし、説明変数を計測開始日から各日までに渡る時間帯別の環境データの累積値とした。表 6 に、トマトの収穫重量と環境因子との重回帰分析結果を示す。ここでは、目的変数を計測期間における各収穫日の株あたりの収穫果実重量とし、説明変数を各収穫日間の時間帯別環境データの累積値とした。

表 5 重回帰分析結果 (開花)

因子	偏回帰係数	標準誤差	t 統計量	p 値
	4.48	0.01	631.73	0.00
気温(1)	-23.26	1.26	-18.47	0.00
気温(2)	16.64	2.49	6.68	0.00
気温(3)	-10.74	2.70	-3.98	0.00
気温(4)	19.97	2.58	7.74	0.00
湿度(1)	-14.85	3.78	-3.93	0.00
湿度(2)	16.70	2.49	6.71	0.00
湿度(3)	-9.93	2.04	-4.87	0.00
湿度(4)	6.45	2.97	2.17	0.03
照度(1)	4.17	0.66	6.29	0.00
照度(2)	1.13	0.50	2.24	0.03
照度(3)	-1.09	0.39	-2.80	0.01
照度(4)	-4.26	0.73	-5.85	0.00
CO ₂ (1)	-1.88	0.89	-2.12	0.03
CO ₂ (2)	3.59	0.86	4.19	0.00
CO ₂ (3)	-3.14	0.68	-4.63	0.00
CO ₂ (4)	1.11	0.82	1.34	0.18

表 6 重回帰分析結果 (収穫重量)

因子	偏回帰係数	標準誤差	t 統計量	p 値
	10.93	7.63	1.43	0.15
気温(1)	-755.33	493.22	-1.53	0.13
気温(2)	624.49	502.69	1.24	0.21
気温(3)	-351.46	364.04	-0.97	0.33
気温(4)	316.28	511.68	0.62	0.54
湿度(1)	-1104.09	961.94	-1.15	0.25
湿度(2)	474.95	431.23	1.10	0.27
湿度(3)	-572.27	258.90	-2.21	0.03
湿度(4)	1221.44	681.92	1.79	0.07
照度(1)	124.54	51.10	2.44	0.02
照度(2)	-171.12	53.56	-3.19	0.00
照度(3)	166.69	56.15	2.97	0.00
照度(4)	-61.44	49.21	-1.25	0.21
CO ₂ (1)	-230.23	97.20	-2.37	0.02
CO ₂ (2)	-87.66	74.83	-1.17	0.24
CO ₂ (3)	56.63	73.22	0.77	0.44
CO ₂ (4)	377.29	101.06	3.73	0.00

3.3 結果考察

表 4、表 5、表 6 から、各生長因子に対する各環境因子の相関の高さ (偏回帰係数の大きさ) の順位が、生長因子ごとに異なるという結果を得た。例えば、草丈では気温(4)18:00-24:00 の偏回帰係数が最も大きい、収穫重量では湿度(4)18:00-24:00 が最も大きい。また、草丈の気温(4)18:00-24:00 は偏回帰係数が負値 (負相関) であるが、収穫重量の気温(4) 18:00-24:00 は正值 (正相関) となった。つまり本結果は、トマト生長が栽培環境から受ける影響は複数の生育ステージごとで異なる可能性を示唆する結果であったと考えられる。

本実験では、トマトの生長データは週 1 回計測、あるいは発生日毎の計測であった。そのため、各重回帰分析において、説明変数 (環境データ) が 16 項目あるのに対して目的変数 (生長データ) 数が数十～数百程度であった。これは、トマトの各株生長には個体差があることも考慮すると

データ数が十分でないと考えられる。また、各環境データについて、例えば同時帯の気温データと湿度データ、あるいは気温の別時刻データ間で高い相関（相関係数 0.7 以上）が確認された。以上から、本結果はモデル化検討の参考材料にはなるが、結果の信頼性という意味では不十分であると考えられる。そのため、より信頼性の高い解析結果を得るために、データ量を増やして解析を深化させていく必要がある。

4. トマト生長のモデル化に向けた検討

本実験結果を踏まえ、トマト生長のモデル化について検討した。本稿では、表 7 に示すように、トマト生長全般（定植～収穫）を複数の生育ステージで分割し、各ステージ別に統計モデルを適用するモデル化方式を検討した。

4.1 統計モデルの適用によるモデル化

本研究のモデル化の目的がトマト生長の予測であることから、線形回帰などの回帰系の統計モデルを適用するのがモデル化に最適であると考えられる。予測モデルの生成であれば深層学習の適用も選択肢に挙げることができる。しかし、トマトを予測対象とした実フィールドへの適用を考慮した場合には、特にトマト（野菜）側のデータ収集が現状手計測による計測しかできないこと、最頻でも日単位程度でのデータ収集になることなどから、深層学習に十分な学習データの収集は現実的に困難であると考えられるため、モデル生成に必要なデータがなるべく少なく済む手法が求められる。

4.2 生育ステージの分割

本実験結果では、生長因子ごとに周囲環境から受ける影響がそれぞれ異なることが示唆された。そこで、各生長因子がそれぞれ生長変化する時期を手掛かりにした、次のような 3 つの生育ステージ分割が適切であると考えられる。

4.2.1 初期栄養生長期

葉茎生長期は、定植から最下段花房が開花するまで、あるいは摘心するまでの期間とする。この期間では、トマト株は主に葉茎の生長（茎伸長や葉展開）にエネルギーが使用される。初期栄養生長期のトマト生長を表現する生長因子には草丈や節数を選択する。

4.2.2 開花結実期

開花結実期は、最下段花房が開花してから最上段花房が開花するまで、あるいは最下段花房の収穫が開始されるまでの期間とする。この期間からは、各花房での開花や果実肥大にもエネルギーが使用される。開花結実期のトマト生長を表現する生長因子として、各花房の開花状況（開花段数）、開花から収穫までの果実肥大に要する日数（開花～収穫開始日数）を選択する。

4.2.3 収穫期

収穫期は、最下段花房の収穫が始まってから収穫完了（栽培終了）までの期間とする。この期間では、下段花房から順に概ね一定のサイクルで収穫が行われる時期である。収穫期のトマト生長を表現する生長因子として、トマトの収穫重量、収穫個数を選択する。

表 7 トマト生長のモデル化方式

	生育ステージ		
	初期栄養 生長期	開花結実期	収穫期
適用モデル	回帰系モデル（線形回帰など）		
目的変数： 生長因子	・草丈 or 節数	・開花段数 ・開花～収穫 開始日数	・収穫重量 ・収穫個数
説明変数： 環境因子	気温／湿度／照度／CO2 濃度		
環境因子 収集時期	定植～	定植～	開花～
開始時期	定植	最下段開花	最下段収穫開始
終了時期	最下段開花 or 摘心	最上段開花 or 最下段収穫開始	収穫終了

4.3 環境データの取り扱い

本実験結果から示唆された、各環境因子の時間帯ごとの影響度の違いに対応するためには、環境データは、昼／夜、あるいはもっと詳細な時間帯で分割をして、それぞれを入力とすることが必要であると考えられる。また、環境データ間の相関に対しては、変数選択の採用や統計モデルの適用方法などの対策が必要であると考えられる。

5. おわりに

本稿では、施設園芸におけるトマト生長と栽培環境との関係解析を行い、トマト生長のモデル化方式について検討した。トマト栽培データに対する重回帰分析により、生長因子ごとに周囲環境から受ける影響が異なること、各環境因子の影響度が時間帯ごとに異なることなどが示唆された。そこで、トマト生長のモデル化方式として、トマト生長全般（定植～収穫）を複数の生育ステージで分割し、各ステージ別に統計モデルを適用するモデル化方式を検討した。ただし、本実験結果および考察は解析データ量が不十分である可能性があるため、今後、観測データ数を増やして検討を深化させていく必要がある。

謝辞

本研究にあたり、筑波大学 つくば機能植物イノベーション研究センターには、本実験用のトマト栽培並びにデータ収集に協力いただいた。

参考文献

- [1] 竹内 智晴, 他, “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”, 情報処理学会第 77 回全国大会 (2015).
- [2] 竹内 智晴, 他, “施設園芸における果菜生長のモデル化に関する一考察～葉菜と果菜の違いに着目した、モデル化、環境制御に対する課題～”, 情報処理学会第 79 回全国大会 (2017)
- [3] E. Heuvelink, “Evaluation of a Dynamic Simulation Model for Tomato Crop Growth and Development,” *Annals of Botany*, 83, pp.413-422, (1999)
- [4] 久枝 和昇, 他, “大規模トマト生産温室における生産性向上に関する研究—積算日射量に基づいたトマトの出荷量予測—”
- [5] 廣木晃人, 他, “温室栽培トマトの生育ならびに果実終了に群落内局所的 CO₂ 施用が及ぼす影響”, 園芸学会平成 29 年度秋季大会, (2017)
- [6] 廣木晃人, 他, “温室栽培トマトにおける着果部位周辺の局所的気温制御が果実肥大に及ぼす影響”, 園芸学会平成 30 年度春季大会, (2018)