

ナス「とげなし輝楽」の促成作型における短期収量予測式の作成

伊藤 緑¹⁾・番 喜宏²⁾・小川理恵¹⁾・恒川靖弘³⁾・大川浩司¹⁾

摘要: ナス「とげなし輝楽」の促成作型において、生育情報(開花数及び着果数)と組み合わせることで短期収量予測が可能となる環境データの選定及び予測式の作成と検証を行った。異なる栽培環境で収集したデータを用いて、目的変数を積算総収量、説明変数を開花数、着果数、積算日平均気温として重回帰分析を行った。予測式は、 $y=80.12a+17.36b+1.59c-575.65$ で表された(自由度調整済決定係数は0.74、 y : 予測開始日から15~21日後の積算総収量($g \cdot m^{-2} \cdot 週^{-1}$)、 a : 予測開始日の開花数(個 $\cdot m^{-2}$)、 b : 予測開始日の着果数(個 $\cdot m^{-2}$)、 c : 予測開始日から20日後までの積算日平均気温($^{\circ}C$))。得られた予測式を用いて、異なる年に収集したデータセットで収量予測を行い、実測値と比較したところ、実測値と予測値は収穫期間を通して概ね一致しており、平均絶対誤差率は32.8(実績値に対し予測値が平均上下32.8%以内にある状況)であった。

キーワード: ナス、収量予測

緒言

ナス栽培においては、収穫・出荷調製に要する時間が、全労働時間の52%と多くを占める¹⁾ことや、収穫期間中に収量の増減が生じることから、生産や労働時間が不安定になることが問題となっている。これらを解決する一つの方策として、事前に収量を予測できれば、作業量に応じて雇用労力の調整が可能となる。さらに、収量予測結果をうけた予約相対販売や栽培管理の変更による生産量の調整が可能になれば、有利販売による農家の収益力向上につながると思われる。

トマトでは、環境データや生育データを用いた機械学習による収量予測²⁾や、植物生理に基づいて乾物生産とその分配率から収量予測を行う方法³⁾が研究されている。機械学習によって収量予測を行うと、その理論が不明確な場合や、過学習により他の栽培施設への適用に課題が残る場合がある。また、植物生理に基づく収量予測を行うためには、光利用効率や果実への乾物分配率等の詳細なパラメータが必要で、生産現場でこれらを計測し、収量予測を行うことは容易ではない。

ナスでは、過去の出荷量及び気象データを学習させたAIによる収量予測の取り組み⁴⁾が実施されているが、用いるデータや予測手法の詳細は明らかにされていない。また、ナスは、全収穫果実のうち、側枝から収穫される果実の割合が高いため、側枝の発生頻度や成長速度が収量に大きな影響を及ぼす。側枝の発生頻度は品種や仕立て方、施肥管理等、多くの要因に影響されるため、ナスにおいて、トマトのように

植物生理に基づいて数か月先の収量を予測することは難易度が高い。

一方、近年、生産現場では、環境モニタリング機器の導入による環境制御技術の普及が進み、温度、湿度、日射量等の環境データの取得が容易になった。また、生育に応じた環境制御の重要性が理解され、生育調査も実施されるようになってきたことから、環境や生育に関する情報が利用可能となった。生育調査には、開花数や着果数等の数週間後の収量に繋がる情報が含まれる。トマトでは、開花日からの積算気温により、収穫時期が予測できることが知られている⁵⁾。ナスにおいても同様に、開花後の環境条件に影響を受けて果実が肥大すると想定することで、開花数及び着果数を用いて2~3週間先の収量予測(以下、短期収量予測)が可能であると考えられる。

本試験では、ナス「とげなし輝楽」において、生育情報(開花数及び着果数)と組み合わせることで短期収量予測が可能となる環境データの選定及び予測式の作成と検証を行った。

材料及び方法

1 短期収量予測に有効な説明変数の選択と予測式の作成(試験1)

(1) 耕種概要

愛知県農業総合試験場(以下、愛知農総試)の単棟丸屋根ビニルハウス(間口5.4 m、奥行10 m)を3棟用いて、2016年、2017年、2019年に温度管理及び二酸化炭素(CO₂)施用

本研究の一部は園芸学会令和3年度春季大会(2021年3月)において発表した。

¹⁾園芸研究部 ²⁾園芸研究部(退職) ³⁾園芸研究部(現農業経営課)

の有無により、異なる環境下で栽培を行った(表1)。いずれの年も、供試品種として台木「トルバム・ビガー」(タキイ種苗株式会社、京都)に穂木「とげなし輝楽」(愛知県種苗協同組合、愛知)を接ぎ木して用いた。定植は9月上旬～下旬に1ハウスあたり2列設置(列の間隔1.8 m)した隔離ベッド(全農スーパードレンベッド55、全国農業協同組合連合会、東京)に株間41 cm(栽植密度1355株/10 a)で行った。収穫開始は10月中旬～下旬で、1果重100～120 gを目安に週2～4回、翌年5月中旬または6月下旬まで収穫した。整枝方法は、2本仕立て側枝1芽切り戻しとし、主枝は12月上旬～下旬に誘引番線の高さ(1.8 m)で摘心した。「とげなし輝楽」は単為結果性を有する品種ではあるが、着果促進のため、第1果房のみ開花時に4-CPA液剤(トマトーン、石原産業株式会社、大阪)を50倍に希釈して噴霧した。

施肥は、灌水同時施肥方式で行い、園試処方に準じた培養液に微量要素肥料(OATハウス5号、OATアグリオ株式会社、東京)を1000 Lあたり50 g添加して用いた。1株当たりの日窒素施用量は生育に応じて70～250 mgとした。

CO₂施用は、液化CO₂を用いてCO₂制御盤(CO₂当盤、トヨタ株式会社、愛知)により12月上旬～3月下旬まで行った。CO₂施用濃度は、施設内気温が換気設定温度よりも2°C以上低い場合は500 ppm、それ以外の場合は400 ppmとした。CO₂施用時間は12～1月は7～15時、2月は7～16時、3月は6～16時とした。

温度管理は、換気扇を用いた強制換気と、温風加温機(KA-125、ネポン株式会社、東京)を用いた加温により行った。CO₂施用期間以外は換気温度28°C、加温温度12°Cとした。CO₂施用期間中は表1に示したとおり、栽培年次及びハウスによって温度管理を変更した。

(2) 調査項目及び調査方法

調査は、栽培ベッドの両端の株を除いて、1区5株を連続して選び、2反復で行った。

生育は、開花数、着果数を週1回調査した。花卉が開き、柱頭が確認できるものを開花とし、開花後に果実が肥大して花卉の抜き取りが可能なるものを着果とした。

総収量として、規格外果実を含む収穫果実の全重量を調査した。

施設内CO₂濃度及び温湿度は、各区の中央1.5 m高に設置した環境モニタリング機器(あぐりログ、株式会社IT工房Z、愛知)またはCO₂濃度測定機(おんどとりTR71-Ui、株式会社ティアンドデイ、長野)及び通風筒内に設置した温湿度測定器(MR6662、株式会社チノー、東京)により5分間隔で計測した。日射量は、場内の気象観測システムのデータを用いた。

(3) 短期収量予測に有効な説明変数の選択と予測式の作成

予測開始日から15～21日後の積算総収量(g・m²)を目的変数とした(図1)。説明変数を予測開始日のm²あたり開花数及び着果数、予測開始日から20日後までの積算日平均気温(°C)及び積算日射量(MJ)、予測開始日から20日後までの日中(7～17時)平均飽差(g・m⁻³)及び日中平均CO₂濃度(ppm)として、重回帰分析を行った。得られた予測値と実測値から平均平方二乗誤差(Root Mean Squared Error、以下RMSE)を求めた。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (\text{予測値} - \text{実測値})^2} \quad n = \text{データ数}$$

2 短期収量予測式の検証(試験2)

(1) 耕種概要

愛知農総試の単棟丸屋根ビニルハウス(間口5.4 m、奥行10 m)を1棟用いて、2018年に栽培を行った。試験1と同様の供試品種を9月21日に定植し、10月17日～6月14日まで収穫した。CO₂施用は11月20日～4月26日まで試験1と同様に行った。温度管理は、表1の2019・②と同様の管理とした。その他の栽培管理については試験1と同様に行った。

(2) 調査項目及び調査方法

生育及び総収量の調査は試験1と同様の方法で行った。施設内気温は、環境モニタリング機器を試験1と同様に設置して5分間隔で計測した。

(3) 短期収量予測の検証

試験1で作成した予測式を用いて短期収量予測を行い、実測値との差を比較した。なお、予測に用いる積算平均気温は、予測開始時点では未知のものであるため、同施設で同様の温度管理を行った別年次の同時期のデータを用い

表1 栽培年次・ハウス別の温度管理及びCO₂施用

栽培年次・ハウス	定植日	収穫期間	換気温度 (CO ₂ 施用 期間中)	加温温度 (CO ₂ 施用 期間中)	CO ₂ 施用 ¹⁾
2016・①		10/12-5/19	28 (31)	12 (15)	有
2016・②	9/10	10/17-5/19	28 (28)	12 (12)	有
2016・③		10/17-5/19	28 (28)	12 (12)	無
2017・①		10/25-6/22	28 (31)	12 (15)	有
2017・②	9/19	10/23-6/22	28 (31)	12 (12)	有
2017・③		10/25-6/22	28 (28)	12 (12)	有
2019・①		10/11-6/20	28 (28)	12 (10～15) ²⁾	有
2019・②	9/21	10/11-6/20	28 (28)	12 (10～20) ³⁾	有
2019・③		10/15-6/20	28 (28)	12 (15)	有

1) CO₂施用濃度:施設内気温が換気温度より2°C以上低い場合500 ppm、高い場合は400 ppm

CO₂施用期間:2016年は12/5-3/31、2017年は12/6-3/28、2019年は12/3-3/25

CO₂施用時間:12～1月は7～15時、2月は7～16時、3月は6～16時

2) 晴天日は0～6時:10°C、6～24時:15°C、雨天日は0～6時:10°C、6～24時:12°C

3) 晴天日は0～6時:10°C、6～8時:15°C、8～19時:20°C、19～24時:15°C、雨天日は0～6時:10°C、6～24時:12°C

予測開始日を0日目とした場合、

予測対象(目的変数)は 15～21日後の積算総収量

↓予測開始日

↓予測対象期間

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21

【予測に用いるデータ(説明変数)】

開花数、着果数 : 予測開始日
積算日平均気温、積算日射量 : 0～20日後の積算値
日中平均CO₂濃度、日中平均飽差 : 0～20日後の平均値

図1 短期収量予測の目的変数及び説明変数

た。得られた予測値と実測値から平均絶対誤差率(Mean Absolute Percentage Error、以下MAPE)を求めた。

$$MAPE = 100/n \sum (| \text{予測値} - \text{実測値} | / \text{実測値}) \quad n = \text{データ数}$$

結果及び考察

1 短期収量予測に有効な説明変数の選択と予測式の作成(試験1)

調査で得られたデータについて、目的変数と説明変数を集計して表2に示した。積算総収量は0~1758.8 g・m²・週⁻¹、開花数は0~16.8個・m²、着果数は0~30.6個・m²、積算日平均気温は312.6~531.2°C、積算日射量は122.4~434.5 MJ、日中平均飽差は0.3~13.7 g・m⁻³、日中平均CO₂濃度は246.3~595.4 ppmであった。

目的変数を積算総収量(g・m²・週⁻¹)とし、説明変数を開花数(個・m²)、着果数(個・m²)、積算日平均気温(°C)、積算日射量(MJ)、日中平均飽差(g・m⁻³)、日中平均CO₂濃度(ppm)として、重回帰分析を行った(表3)。各説明変数についてみると、日中平均飽差及び日中平均CO₂濃度については、偏回帰係数の有意性はみられなかったことから、説明変数として不適当であると考えられた。

このことから、目的変数(y)を積算総収量(g・m²・週⁻¹)とし、説明変数を(a)開花数(個・m²)、(b)着果数(個・m²)、(c)積算日平均気温(°C)、(d)積算日射量(MJ)として、開花数及び着果数に積算日平均気温と積算日射量を組み合わせた3パターンの重回帰分析を行った(表4)。予測式は、

$$A: y = 76.42a + 13.81b + 1.06c + 0.53d - 456.41$$

$$B: y = 80.12a + 17.36b + 1.59c - 575.65$$

$$C: y = 76.44a + 12.75b + 0.89d - 122.95$$

で表された。自由度調整済決定係数及びRMSEはそれぞれ、Aでは0.75・157.7、Bでは0.74・161.1、Cでは0.74・162.2であり、わずかな差ではあるが、予測精度はA、B、Cの順に優れた。短期収量予測の実用性を考えると、予測に用いる説明変数は少ない方が簡便である。さらに、今後、短期収量予測を用いて環境制御による生産量の調整を行う場合があることを考慮すると、制御が困難な積算日射量よりも制御が容易な積算日平均気温を用いることが適切と考えられる。このため、開花数、着果数に加えて、積算日平均気温を用いた予測式Bを用いることとした。

予測式Bを用いて予測を行った場合に、栽培年次や栽培条件で予測精度に影響がないか、散布図で確認した(図2)。栽培年次や栽培条件ごとに、予測残差(実測値と予測値との差)の平均値に差はなかったことから、栽培年次や栽培条件による影響は小さいと考えられた。しかし、実測値が低い値の場合(概ね収穫開始から4週間程度の間)は、収量予測値が高めに算出される傾向があった。これは、収穫初期は収穫盛期と異なり、①開花数や着果数が少ないため、着果不良等が発生した場合に、1果の収穫の有無が収量全体に占める割合が高いこと、②植物体の成長が旺盛な時期であり、さらに着果数も少ないため、果実肥大の様相が異なる可能性があることが原因と考えられた。

2 短期収量予測式の検証(試験2)

調査で得られたデータについて、試験1と同様に集計した(表5)。積算総収量は31.8~1491.2 g・m²・週⁻¹、開花数は0~15.9個・m²、着果数は0~29.1個・m²、積算日平均気温は336.2~517.5°Cで、いずれの項目も試験1で収集したデータの範囲内であった。

試験1で作成した予測式Bを用いて短期収量予測を行い、実測値と比較した(図3)。実測値と予測値は収穫期間を通して概ね一致しており、MAPEは32.8であった。しかし、収穫初期については、試験1と同様に収量予測値が実測値より高く算出された。このことから、収穫初期については、異なる予測手法を検討する必要があると考えられた。

以上のことから、予測開始日の開花数、予測開始日の着果数及び予測開始日から20日後までの積算日平均気温を用いることで、「とげなし輝楽」の予測開始日から15~21日後

表2 目的変数及び説明変数の集計結果(試験1)

	最大値	最小値	平均値	標準偏差
積算総収量(g・m ² ・週 ⁻¹)	1758.8	0.0	582.3	321.4
開花数(個・m ²)	16.8	0.0	4.4	2.2
着果数(個・m ²)	30.6	0.0	10.2	4.9
積算日平均気温 ¹⁾ (°C)	531.2	312.6	393.0	46.7
積算日射量 ²⁾ (MJ)	434.5	122.4	266.2	97.0
日中平均飽差 ³⁾ (g・m ⁻³)	13.7	0.3	5.5	3.3
日中平均CO ₂ 濃度 ³⁾ (ppm)	595.4	246.3	412.5	76.5

- n=284 1) 予測開始日から20日後までの日平均気温の積算値
 2) 予測開始日から20日後までの屋外日射量の積算値
 3) 予測開始日から20日後までの7~17時の平均値

表3 重回帰式の各項目の偏回帰係数

項目	偏回帰係数	有意性 ¹⁾
重回帰式	-	※
開花数	73.91	※
着果数	13.27	※
積算日平均気温	1.43	※
積算日射量	0.77	※
日中平均飽差	-10.23	n.s.
日中平均CO ₂ 濃度	0.06	n.s.
切片	-616.17	※

重回帰式の自由度調整済決定係数は0.75(n=284)

1) ※:1%水準で有意性あり、n.s.:有意性なし(t検定)

表4 収量予測式の比較

予測式	予測式の偏回帰係数および切片					自由度調整済決定係数	RMSE ¹⁾
	開花数	着果数	積算日平均気温	積算日射量	切片		
A	76.42	13.81	1.06	0.53	-456.41	0.75	157.7
B	80.12	17.36	1.59	-	-575.65	0.74	161.1
C	76.44	12.75	-	0.89	-122.95	0.74	162.2

すべての偏回帰係数および切片は1%水準で有意性あり(n=284、t検定) 1) Root Mean Squared Error

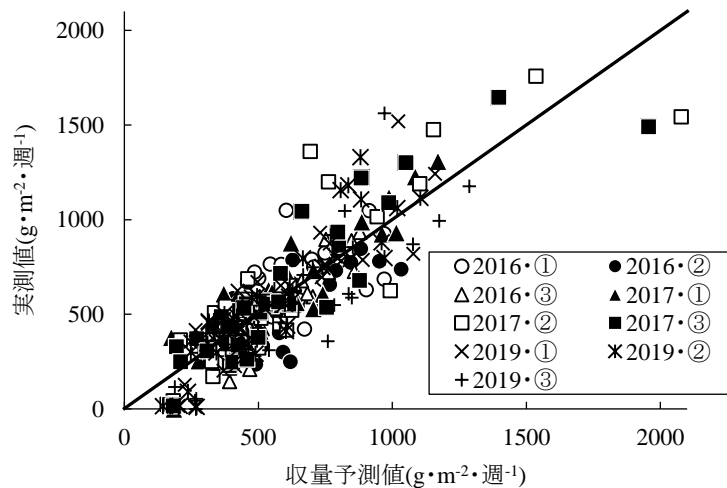


図2 予測式Bを用いた収量予測値と実測値の分布

n=284、実線は傾き1の直線

栽培年次・栽培条件ごとの予測残差の平均値に1%水準で有意差なし(一元配置分散分析)

表5 目的変数及び説明変数の集計結果(試験2)

	最大値	最小値	平均値	標準偏差
積算総収量(g・m ² ・週 ⁻¹)	1491.2	31.8	604.8	342.8
開花数(個・m ²)	15.9	0.0	5.0	3.4
着果数(個・m ²)	29.1	0.0	11.4	6.8
積算日平均気温 ¹⁾ (°C)	517.5	336.2	399.5	47.5

n=35 1) 予測開始日から20日後までの日平均気温の積算値

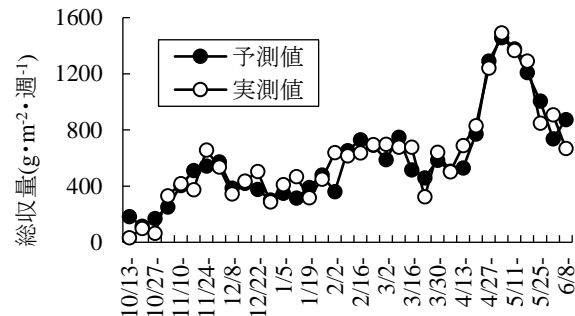


図3 予測式Bを用いた収量予測値と実測値の推移

の積算総収量の予測が可能であることが明らかになった。なお、予測に用いる積算日平均気温は、予測開始時点では未知のものであるため、気象予報の下に過去の同気象時の同施設・同様の温度管理でのレガシーデータを用いることで対応可能と考えられる。

「とげなし輝楽」は単為結果性品種で、果実肥大特性が非単為結果性品種と異なる可能性があるため、予測式の他品種への適用については検討が必要である。また、本試験で作成した予測式は、規格外果実を含む果実の総収量を予測するものであるため、不良果等が発生し、可販果率が低下した場合は、予測値と実測値が大きく異なってしまう。しかし、「とげなし輝楽」は、可販果率が高い品種である⁹⁾ため、総収量は可販果収量とほぼ等しく、出荷量を概ね予測することが可能と考えられる。

今回の試験では、開花数、着果数を調査した株と同一の株で収量調査を行った。実用上では、少数の株での抽出調査結果から、多様な生育状況の株を含む、ほ場全体の収量を予測することが求められる。今後は、収穫始期の予測精度を高めるとともに、抽出調査データから全体の予測が実用レベルで可能かどうか、生産者ほ場で再現性の確認を行う必要がある。

引用文献

1. 農林水産省. 平成24年営農類型別経営統計(個別経営、第2分冊、野菜作・果樹作・花き作経営編). 2014 https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/noukei/einou_kobetu/index.html (2021.6.2参照)
2. 上村真史, 渡邊真也, 堀江達郎, 小林洋介, 佐藤和彦, 岸上順一. 施設トマト栽培における多面的収量予測手法の検討. 情報処理学会第82回全国大会講演論文集. 2020(1), 161-162(2020)
3. 東出忠桐. 施設トマトの収量増加を目的とした受光と物質生産の関係の利用. 園学研. 17(2), 133-146(2018)
4. 農林水産技術会議. 2019年農業技術10大ニュース. <https://www.affrc.maff.go.jp/docs/press/191224.html> (2021.6.2参照)
5. SHP関東地域農業研究・普及協議会. 低段・多段組合せ栽培によるトマトの周年多収生産技術マニュアル. 2010
6. 穴井尚子, 久野哲志, 田中哲司, 番喜宏, 榊原政弘, 山下文秋, 矢部和則, 齊藤猛雄, 吉田建実, 松永啓, 齊藤隆徳, 斎藤新, 山田朋宏. 単為結果性ととげなし性を併せ持つナス「試交05-3」の育成. 愛知農総試研報. 41, 67-75(2009)