

キュウリ個葉面積の簡易な測定方法と評価

中畝誠*・山田融**

Simple Methods for Measuring and Evaluating Individual Leaf Area of Cucumber (*Cucumis sativus* L.)

Makoto NAKAUNE, Toru YAMADA

要 約 キュウリ品種「千秀 2 号」を用いて個葉面積回帰モデルの作成を試みた。個葉面積は葉長および葉幅の積を説明変数とする線形回帰モデル ($LA=0.8177LW-10.86$, LA : 葉面積(cm^2), L : 葉長(cm), W : 葉幅(cm)) の予測精度が最も良く、栽培年、作型および品種の異なるキュウリ葉に対しても予測精度が維持されており、汎化性能が確認された。また、この線形回帰モデルを基に作成した個葉面積推定表も線形回帰モデルと比較して予測精度が保たれていた。

葉は光合成をおこなう器官であり、作物の生長および生産性に関与する。トマトでは単位面積当たりの葉の面積を示す葉面積指数 (LAI) を指標として栽培管理が行われており、LAI は 3 を目安として、4 程度での管理が好適とされている (東出, 2014)。

そのため個葉面積を推定する方法として、トマト (樋江井ら, 2018) やイチゴ (安藤(小島)・小川, 2020) などで葉長、葉幅、葉柄の長さなどの変数、あるいはこれらの変数の組み合わせを利用した回帰モデルが開発されている。この方法は葉を摘み取る必要がなく非破壊で行えることから、植物の成長に大きな影響を与えることなく同じ個体を繰り返し測定できるため、広く利用されている。

キュウリにおいても Robbins and Pharr (1987) はアメリカでピクルスタイプ, Blanco and Folegatti (2005) はブラジルで日本型, Karaca *et al.* (2020) はトルコでベイトアルファタイプのキュウリ品種を用いて、それぞれ個葉面積を推定する回帰モデルを報告している。また、Blanco and Folegatti (2005) および Karaca *et al.* (2020) は、葉長および葉幅の積を説明変数とした計算が簡単で利用しやすい線形

回帰モデルを提案している。しかし、日本で栽培された日本型キュウリ品種とその栽培環境に適応可能かは不明である。

そこで本研究では、農業技術研究センター内において栽培した日本型キュウリ品種を用いて線形回帰モデルを作成しその精度を評価し、個葉面積の簡易な測定方法について検討したので報告する。

材料および方法

1 個葉面積回帰モデルの作成と評価

(1) 葉の採取および調査方法

埼玉県農業技術研究センター内の鉄骨ハウスにて、2019 年に半促成作型 (2 月 15 日定植) および抑制作型 (8 月 29 日定植) にて「千秀 2 号」をつる下ろし栽培し、各作型の栽培終了時に葉長及び葉幅が 7 cm 以上で誘引側枝上位から下位まで葉が平均的に含まれるように 90 枚以上採取した。これらの全葉について、葉長は葉身の先端から葉身と葉柄の交点まで、葉幅は最も広い葉身を測定した (図 1)。また、デジタルカメラでキュウリ個葉の画像を撮影し、画像処理

*施設園芸先端技術担当, **施設園芸先端技術担当 (現農業大学校)

ソフト「Image J」を用いて個葉面積を求め実測値とした。

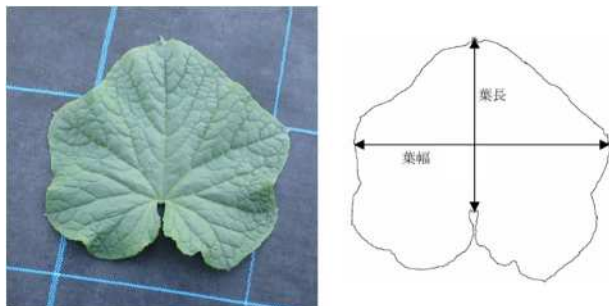


図1 キュウリ葉と測定部位

(2)個葉面積回帰モデルの作成

各作型から採取した 90 枚, 合計 180 枚の葉を用い, 個葉面積を応答変数, 葉長, 葉幅および葉長と葉幅の積を説明変数とする線形回帰モデルを作成した。

(3)個葉面積回帰モデルの評価方法

葉サンプルを両作型から各 15 枚, 合計 30 枚抽出したデータを用い, 各回帰モデルにおいて個葉面積の推定値を求め, 回帰モデルの評価を行った。評価には, 決定係数 (R^2), 平方平均二乗誤差 (Root Mean Squared Error, 以下, RMSE), 平均相対誤差 (Mean Relative Error, 以下, MRE) の 3 つの指標を用いた。RMSE および MRE の算出方法は以下の計算式のとおりである。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (\text{推定値} - \text{実測値})^2}$$

$$MRE = \frac{1}{n} \sum (|\text{推定値} - \text{実測値}| / \text{実測値})$$

n = サンプル数

2 個葉面積回帰モデルの汎化性能の評価

(1)葉の採取および調査方法

汎化性能の評価には, 回帰モデルの作成と評価に使用した葉とは別のサンプルを用いた。2020 年に抑制作型 (8 月 27 日定植) の「千秀 2 号」および 2021 年に半促成作型 (2 月 12 日定植) にて「千秀 2 号」と「ニーナ」を栽培し, それぞれ栽培後半に誘引側枝の上位から下位までの葉が平均的に含まれるように 20 枚程度採取した。葉の調査は, 前述の個葉面積回帰モデルの作成と同様に行った。

(2)汎化性能の評価方法

作成した回帰モデル A, B および C について各サン

プルの個葉面積の推定値を求め, RMSE および MRE を算出して汎化性能を評価した。

(3)先行研究モデルの評価

既報のキュウリ葉面積推定モデルの汎化性能を評価するため, 本研究のサンプルを用いて Robbins and Pharr (1987), Blanco and Folegatti (2005) および Karaca *et al.* (2020) により提案された回帰モデルにより葉面積の推定を行った (表 5)。

3 個葉面積推定表の作成と評価

(1)個葉面積推定表の作成

回帰モデルの作成と評価に用いた葉のサンプルの特性 (表 1) および汎化性能の評価において最も予測精度が良好であったモデルを用いて, あいち型植物工場マニュアル (2016) のトマトの葉面積推定方法を参考に個葉面積推定表を作成した。調査した葉のデータをもとに, 葉長と葉幅は 8cm から 2cm 間隔でそれぞれ 24cm と 30cm まで設けるとともに, 葉幅/葉長の値は約 1.3 (表 1) であったことから, 葉幅/葉長が 1.0 から 1.5 を目安に葉長と葉幅の積の値を回帰モデルに代入し, 個葉面積の推定値を記入した。

(2)個葉面積推定表の評価方法

個葉面積回帰モデルの評価および汎化性能評価に用いたサンプルについて, 推定表から個葉面積の推定値を求めるとともに, RMSE および MRE を算出し, 個葉面積推定表を評価した。

結 果

1 個葉面積回帰モデルの作成と評価

調査した葉の葉長, 葉幅および個葉面積は表 1 のとおりであった。半促成作型は葉長 7.7~21.0 cm, 葉幅 9.1~26.4 cm, 個葉面積 34.1~487.7 cm², 抑制作型では葉長 8.3~22.4 cm, 葉幅 9.1~27.4 cm, 個葉面積 53.2~435.4 cm² の範囲であった。いずれの平均値も半促成作型は抑制作型と比較してやや小さい傾向にあったが, F 検定および t 検定を行った結果, 有意差はみられなかった。

個葉面積を求めるための線形回帰モデルは表 2 のとおりであった。モデル C の R^2 は 0.93 で 1 に最も近く, RMSE および MRE の値は他のモデルよりも小さく, それぞれ 26.57 および 0.14 であった。

表 1 個葉面積回帰モデル作成に用いた葉サンプルの特性^{a)}

栽培年	作型	品種	葉長 (cm)				葉幅 (cm)				個葉面積 (cm ²)				葉幅/葉長
			平均	標準偏差	最小	最大	平均	標準偏差	最小	最大	平均	標準偏差	最小	最大	
2019年	半促成	千秀2号	16.7	3.1	7.7	21.0	20.7	3.7	9.1	26.4	278.2	98.2	34.1	487.7	1.24
2019年	抑制	千秀2号	16.8	3.1	8.3	22.4	21.5	3.9	9.1	27.4	297.9	95.9	53.2	435.4	1.28
	F検定		ns ^{b)}				ns				ns				
	t検定		ns				ns				ns				

a) 各作型のサンプル葉 n=90.

b) ns は有意差なし.

表 2 個葉面積回帰モデルと評価

モデル	回帰式 ^{a)}	R ² ^{b)}	RMSE ^{c)}	MRE ^{d)}
A	LA=29.883L-212.98	0.89	31.12	0.15
B	LA=24.535W-230.76	0.91	33.77	0.17
C	LA=0.8177LW-10.86	0.93	26.57	0.14

a) LA, L, W および LW はそれぞれ個葉面積, 葉長, 葉幅および葉長と葉幅の積の値.

b) R² は決定係数.

c) RMSE は平方平均二乗誤差.

d) MRE は平均相対誤差.

表 3 個葉面積回帰モデル汎化性能の評価に用いた葉サンプルの特性^{a)}

栽培年	作型	品種	葉長 (cm)				葉幅 (cm)				個葉面積 (cm ²)			
			平均	標準偏差	最小	最大	平均	標準偏差	最小	最大	平均	標準偏差	最小	最大
2020年	抑制	千秀2号	15.5	3.5	8.2	20.1	19.7	4.7	9.1	25.2	253.0	114.4	49.8	428.5
2021年	半促成	千秀2号	14.8	2.4	10.0	18.1	19.0	2.6	13.7	22.0	201.9	58.6	103.8	280.6
2021年	半促成	ニーナ	13.5	2.0	11.0	17.1	17.2	2.3	13.6	21.2	173.6	54.6	93.6	284.1

a) サンプル葉は「ニーナ」 n=19, その他は n=20.

表 4 個葉面積回帰モデルの汎化性能評価

栽培年	作型	品種	モデル A		モデル B		モデル C	
			RMSE	MRE	RMSE	MRE	RMSE	MRE
2020 年	抑制	千秀 2 号	27.07	0.12	30.35	0.19	19.00	0.06
2021 年	半促成	千秀 2 号	36.86	0.15	36.78	0.18	28.29	0.11
2021 年	半促成	ニーナ	33.58	0.15	28.89	0.15	25.82	0.11

2 個葉面積回帰モデルの汎化性能の評価

個葉面積回帰モデルの汎化性能評価に用いた葉の葉長、葉幅および個葉面積は表3のとおりであった。2020年の抑制作型「千秀2号」は葉長8.2～20.1 cm、葉幅9.1～25.2 cm、個葉面積49.8～428.5 cm²、2021年の半促成作型「千秀2号」と「ニーナ」はそれぞれ葉長10.0～18.1 cm と 11.0～17.1 cm、葉幅13.7～22.0 cm と 13.6～21.2 cm、個葉面積103.8～280.6 cm² と 93.6～284.1 cm² の範囲であった。

各サンプルにおけるモデル C の RMSE および MRE の値は他のモデルと比較して最も低く、それぞれ 19.0～28.29 および 0.06～0.11 であった (表4)。

モデル C について、個葉面積回帰モデル作成時に評価した際の RMSE 26.57 および MRE 0.14 (表2) は、汎化性能を評価した場合と比較して、2021年の半促成作型「千秀2号」の RMSE 以外の値より小さかった (表4)。

本研究のサンプルを用いた場合の先行研究モデル

の RMSE および MRE の値は 21.6～50.75 および 0.08～0.23 であり、いずれのサンプルにおいても Robbins and Pharr (1987) のモデルの値が最小であった (表5) が、モデル C はこれよりもさらに小さい値であった (表4)。

3 葉面積推定表の作成と評価

モデル C を基に葉面積表を作成した (図2)。個葉面積回帰モデルの作成と評価した際の一部および汎化性能の評価に用いたサンプルを使い、葉面積推定表を評価した (表6)。2019年のサンプルを用いた RMSE および MRE の値はそれぞれ 27.55 と 0.16 (表6) であり、個葉面積回帰モデル C を評価した際の RMSE 26.57 および MRE 0.14 (表2) と比較して大きな差はみられなかった。また、2020年と2021年のサンプルを用いた RMSE と MRE の値についてもモデル C の汎化性能を評価した際の値 (表4) と比較して大きな差はみられなかった。

表5 先行研究の個葉回帰モデルによる評価

栽培年	作型	品種	先行研究の個葉面積回帰モデル					
			LA = 0.89LW -20.58 ^{a)}		LA = 0.88LW -4.27 ^{b)}		LA = 0.85LW -6.29 ^{c)}	
			RMSE	MRE	RMSE	MRE	RMSE	MRE
2020 年	抑制	千秀2号	21.60	0.08	31.32	0.14	22.83	0.10
2021 年	半促成	千秀2号	39.18	0.16	50.75	0.23	40.57	0.18
2021 年	半促成	ニーナ	29.79	0.13	38.23	0.20	31.79	0.16

a) Robbins and Pharr (1987) より引用。

b) Blanco and Folegatti (2005) より引用。

c) Karaca et al.(2020) より引用。

表6 葉面積推定表の評価

栽培年	作型	品種	RMSE	MRE
2019 年	半促成・抑制	千秀2号	27.55	0.16
2020 年	抑制	千秀2号	21.68	0.07
2021 年	半促成	千秀2号	28.38	0.08
2021 年	半促成	ニーナ	30.57	0.13

		葉幅 (cm)											
		8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
葉長 (cm)	8	41 ^{a)}	55	68	81								
	10		71	87	104	120							
	12			107	127	146	166						
	14				149	172	195	218					
	16					198	225	251	277	303			
	18						254	284	313	342	372		
	20							316	349	382	414	447	480
	22								385	421	457	493	529
	24									460	499	539	578

図 2 葉面積推定表

a) 葉面積の推定値 (cm²)

考 察

1 個葉面積回帰モデルの作成と評価

2019 年の半促成と抑制作型の葉長、葉幅および個葉面積について F 検定を行ったところ、サンプル間の分散に有意差が見られなかった。また、各項目の平均値も t 検定により有意差がみられなかった。これらのことから、栽培時期による影響は小さいと考えられたため、データを統合して個葉面積回帰モデルを作成した。

回帰モデルの評価は、複数の指標が併用されており（安藤(小島)・小川, 2020, 樋江井ら, 2018, Karaca *et al.*, 2020), 本研究においても R^2 , RMSE および MRE を用いて評価を行った。 R^2 は、モデルが実際のデータのばらつきを説明できるかを示す指標であり、モデル全体の適合度を評価している。1 に近いほど、モデルの予測精度が高いことを示し、個葉面積の変動を説明変数がどの程度説明できるかを評価している。説明変数に葉長と葉幅の積の値を用いたモデル C の R^2 は 0.93 (表 2) であり、他のモデルよりも予測精度が高いと考えられた。また、RMSE は、実測値と予測値の誤差の絶対的な大きさを、MRE は、実測値と予測値の誤差を相対的な大きさとして示している。両指標はともに数値が小さいほど予測精度が高いことから、RMSE および MRE の値が最も小さい (表 2) モデル C の予測精度が優れていると判断した。

葉長または葉幅のいずれかの値を用いた回帰モデルよりも両方の測定値を用いた回帰モデルの方が精度よく個葉面積を求められ、これは、および Robbins and

Pharr (1987) および Blanco and Folegatti (2005) の報告と一致した。

2 個葉面積回帰モデルの汎化性能の評価と先行研究との比較

良い回帰モデルは、新しいデータに対しても正確な予測ができる「汎化能力」を持つことが重要になる。モデル C を 2020 年と 2021 年の作型や品種の異なるサンプルで評価したところ、2019 年のサンプルに対する精度と比較して大きな差がみられなかった (表 2 および表 4)。この結果から、モデル C は栽培時期や品種が異なっても良好な予測精度を維持していることが確認された。

先行研究の葉面積推定モデルについても評価したところ、モデル C より RMSE および MRE の値は大きくなったものの、大幅な精度の低下はみられなかった (表 4 および表 5)。これは、キュウリが品種や栽培環境によらず葉長と葉幅の積を用いたモデルで葉面積を推定できる植物であることを示しており、Blanco and Folegatti (2005) の示唆を他のモデルでも確認した。

一方、モデル C は先行研究の回帰モデルよりも常に小さい RMSE および MRE 値を示し、最も高い予測精度を維持していた (表 4 および表 5)。これにより、一般的な回帰モデルを用いるだけでなく、品種や栽培環境に適応した個別の回帰モデルを構築することで、より高精度な個葉面積の推定が可能となることが示唆された。

3 葉面積推定表の作成と評価

試験および生産者のほ場で計算を必要とせず、簡易的に個葉面積を求めることができれば、調査の効率化が図られ、利便性が向上する。そこで、モデル C の回帰式から個葉面積推定表 (図 2) を作成し、その精度を RMSE および MRE を指標として評価した。その結果、個葉面積推定表の RMSE および MRE の値 (表 6) は、個葉面積回帰モデル C の作成時 (表 2) および汎化性能評価 (表 4) と比較して大きな変動はなく、簡易な推定手法として十分に実用可能であることが確認された。

トマトでは、葉面積推定表を用いて平均的な大きさの葉 10 枚程度を測定し、その平均値を用い LAI を算出する方法が提案されている (あいち型植物工場マニュアル, 2016)。本研究の結果から、キュウリにおいても同様の方法を用いることで簡易的に LAI の算出が可能となることが示唆された。

引用文献

愛知県農業総合試験場 (2016) : あいち型植物工場マ

ニュアル (トマト編)

安藤(小島)寛子・小川理恵 (2020) : イチゴの葉面積を推定する回帰モデルの作成. 愛知県農総試研報 52, 49-56.

Blanco F.F. and Folegatti M.V. (2005): Estimation of leaf area for greenhouse cucumber by linear measurements under salinity and grafting. *Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.)* 62(4), 305-309.

東出忠桐 (2014) : 環境制御から見たトマトの生理・生態的特性. 最新農業技術野菜 7. pp.44-45, 農山漁村文化協会, 東京.

樋江井清隆・伊藤緑・番喜宏・恒川靖弘 (2018) : 非破壊によりトマトの個葉面積を推定する回帰モデルの構築及び検証. 愛知県農総試研報 50, 19-26.

Karaca C., Büyüktaş D. and Şehir S. (2020): Determination of leaf area of some vegetable plants grown under greenhouse condition by non-destructive methods. *HortiS.* 38(1), 23-28.

Robbins N.S. and Pharr D.M. (1987): Leaf area prediction models for cucumber from linear measurements. *HortScience.* 22, 1264-1266.