

## 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

樋江井清隆<sup>1)</sup>・伊藤 緑<sup>1)</sup>・番 喜宏<sup>1)</sup>・恒川靖弘<sup>1)</sup>

**摘要**：トマト生産者及び現場指導者による葉面積指数の算出を補助する技術として、任意の圃場の任意の葉で個葉面積を非破壊で簡易に推定する手法を開発した。品種「りんか409」の本葉742枚を調査して、個葉面積(y)を応答変数に、葉長(L)及び葉幅(W)を説明変数に用いる14種類の回帰モデルを構築し、交差検証した。更に、モデル構築と異なる環境から得たデータセット(n=70)を用いてモデルを検証した。予測力及び精度を評価した結果、葉幅のみを説明変数とする三つのモデルを選択した。これらモデルをその他4品種(n=230)に適用した結果、すべての品種で高い予測力・精度を示す二つのモデルを選択した。これらは一般化線形モデルで導出された( $\ln(y) = a \ln(W) + b$ , Ln: 自然対数、a及びb: パラメータ、確率分布: 正規分布又はガンマ分布に従うと仮定)。葉幅のみを用いる1変数のモデルが葉長及び葉幅を用いる2変数のモデルに比べて高い頑強性を示した。供試した5品種では、葉長と葉幅との間に強い相関が認められ( $r=0.922\sim0.953$ )、両変数を含む重回帰モデルは多重共線性を内包(VIF=6.7~10.9)するものと考えられた。

**キーワード**：非破壊、トマト、葉面積、一般化線形モデル、多重共線性

## Construction and Validation of Regression Models to Non-destructively Estimate Individual Leaf Area in Tomato

HIEI Kiyotaka, ITO Midori, BAN Yoshihiro and TSUNEKAWA Yasuhiro

**Abstract** : To assist tomato growers and agricultural advisers in calculating leaf area index, we developed a method for non-destructively and easily estimating the area of individual leaves of tomato. Fourteen types of regression-model candidates with individual leaf area (y) as a response variable, and leaf length (L) and width (W) as explanatory variables were cross-validated through examination of 742 leaves of the cultivar 'Rinka 409'. Moreover, these candidate models were validated using another dataset (n = 70), which were obtained from one different cultivation environment. Three models, which used width alone as an explanatory variable, were selected based on predictive capability and accuracy. These three models were applied to another four cultivars (n = 230). Consequently, two models were selected from these, because of their higher predictive capability and accuracy across all cultivars. The models were derived using generalized linear models with a normal distribution or gamma distribution as follows:  $\ln(y) = a \ln(W) + b$ , where Ln denotes the natural logarithm, a and b denote parameters. The above models using leaf width alone showed higher robustness than models using both the length and width. Multiple regression models, which include the length and width, seemed to involve multicollinearity (VIF = 6.7–10.9), because there were strong correlations between both variables ( $r = 0.922\sim0.953$ ) in the five examined cultivars.

**Key Words** : Non-destructive, Tomato, Leaf Area, Generalized Linear Model, Multicollineality

---

本研究の一部は園芸学会平成28年度春季大会(2016年3月)において発表した。  
本研究は共同研究「施設トマトの多収生産技術の開発」により実施した。

<sup>1)</sup>園芸研究部

## 緒言

トマト栽培では、群落の繁茂状態・受光体勢を評価するために葉面積指数(以下、LAI)が用いられ、好適なLAIは3~4とされる<sup>1)</sup>。しかし、生産者が自己の圃場に栽植されたトマトのLAIを立毛状態で把握することは容易でない。一方、長段栽培の普及が進む生産現場では、栽植条件又は繁茂状態にかかわらず、慣行的に葉数のみを目安(例えば15~20枚)に摘葉する事例が多く、LAIを指標とする管理の実践には至っていない。このことから、生産者及び現場指導者によるLAIの把握は、適切な仕立て方法・肥培管理等の決定に役立ち、個々の栽植条件に好適な受光体勢の獲得に寄与するものと考えられる。

LAIは単位土地面積当たりの総葉面積で表されるが、栽植密度・株当たり着生葉数・個葉面積の各要素に分解することができる。このうち、本研究では個葉面積に着目した。トマトの個葉面積を葉長及び葉幅から推定する手法には、SchwarzとKläring<sup>2)</sup>、BlancoとFolegatti<sup>3)</sup>、Villacampaら<sup>4)</sup>、Dannehlら<sup>5)</sup>及びKüctükönderら<sup>6)</sup>による先行研究がみられ、羽状複葉でも葉長及び葉幅から葉面積を推定できることが明らかにされている。このうち、Dannehlら<sup>5)</sup>は遺伝子型が大きく異なる場合、品種毎にモデルを構築すべきと指摘しているが、先行研究の中に日本の品種は見当たらない。日本の品種は、オランダの品種と地上部の形態に差異が認められるとの報告もあり<sup>7)</sup>、葉の形態についても海外の品種と差異がみられるものと予想される。従って、国内の生産現場で葉面積を推定するには、新たにモデルを構築する必要がある。

そこで本報では、県内の主要品種である「りんか409」のほか4品種を用い、LAI把握に資する個葉面積の推定技術について検討した。その結果、生産現場で利用し得る知見を得たので報告する。

## 材料及び方法

### 試験1 品種「りんか409」を対象とした個葉面積を推定する回帰モデルの構築及び検証

#### (1) 栽培環境

##### ア モデルの構築及び検証I

試験場所は愛知県農業総合試験場(以下、農総試)内の高軒高ハウス(266 m<sup>2</sup>)とした。供試品種は「りんか409」(株式会社サカタのタネ、神奈川)とし、台木「がんばる根3号」(愛三種苗株式会社、愛知)に接ぎ木して用いた。作型は抑制及び半促成栽培とし、それぞれ播種2014年6月24日・接ぎ木7月14日・定植7月28日及び播種2014年11月10日・接ぎ木12月10日・定植2015年2月2日とした。栽培方式は砂壤土を詰めた隔離床における灌水同時施肥栽培とし、栽植様式は株間18 cm×畝幅180 cmで1株ごとに振り分けて誘引した。両作型の株当たり施肥量は、窒素-リン酸(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)-カリウム(K<sub>2</sub>O) = 抑制:15.9-5.7-23.3 g及び半促成:11.0-

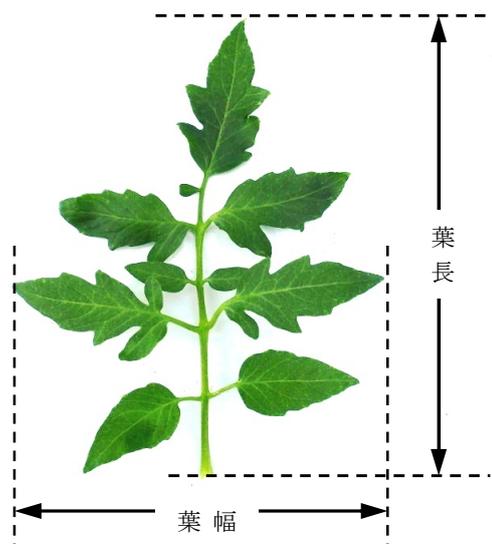


図1 葉面積推定に用いる測定箇所

3.9-16.1 gとした。いずれも二酸化炭素を施用しなかった。その他の栽培管理は農総試の慣行法に準じた。

#### イ モデルの検証II

試験場所は、農総試の南東約70 kmに位置するJAあいち経済連営農支援センター(以下、ASC)内の高軒高ハウス(528 m<sup>2</sup>)とした。供試品種は農総試と同様とし、作型は促成長期栽培で、購入した苗を2014年8月8日に定植して翌年7月まで収穫した。栽培方式はロックウール培地(grodan、オランダ)を用いた養液栽培とし、栽植様式は株間16 cm×畝幅200 cmで1株ごとに振り分けて誘引した。養液管理は、園試処方に準拠しながら生育に応じてEC0.8~2.2 dS m<sup>-1</sup>で、排液率20~30%を目安に給液した。11月~翌年3月には二酸化炭素を施用し、施設内の濃度を密閉時500~600 μmol mol<sup>-1</sup>、換気時400 μmol mol<sup>-1</sup>を目標に管理した。その他の栽培管理は県内産地の慣行法に準じた。なお、群落形成後には着生葉数15枚程度で管理した。

#### (2) サンプル採取及び調査の方法

##### ア モデルの構築及び検証I

いずれの作型も同一圃場の異なる区画(東・西区画)からそれぞれ中庸な5株を抽出し、十分に展開した本葉のうち奇形でなく損傷がみられないものを全て採取した。サンプル採取・調査日は、栽培期間中の随時(下葉除去時)、及び栽培終了後の株解体時とした。供試したサンプル葉は、東区画から369枚(抑制:207枚、半促成:162枚)、西区画から373枚(抑制:209枚、半促成:164枚)とした。測定項目は図1に示した葉長(葉柄含む)、葉幅(葉軸に直角方向の最大幅)及び葉面積とした。前二者の測定には柔軟なグラスファイバー製メジャー(KB15、原度器株式会社、神奈川)を用い、葉面積の測定には葉面積計(GA-5、東京光電株式会社、東京)を用いた。なお、半促成栽培で得られた両区画のサンプル葉の中から、一部を品種別形態的特性の調査にも供した。このことについては、試験2で詳述する。

### イ モデルの検証Ⅱ

12月19日及び6月24日に展開している本葉を、主枝又は側枝の上～下位葉から、奇形・損傷がみられずかつ多様な大きさの葉が含まれるように圃場内から無作為に採取した(12月:35枚、6月:35枚)。サンプル葉の調査方法は、試験1(2)アに準じた。

#### (3) 解析方法

モデル構築及び検証Ⅰでは、農総試で得られたデータセットを同一圃場内の異なる区画から得た二つのサブデータセットに分けて交差検証に供した。検討したモデルは、葉面積(y)を応答変数、葉長(L)及び葉幅(W)を説明変数に用いる回帰分析により導出した。モデル式は、いずれも一つ

又は二つの説明変数による構成とした。検証Ⅱではモデル構築用と異なる環境で得られたデータセットを用いた。モデルの評価は、予測力についてAIC(赤池情報量規準)を、精度について以下に示すRMSE(Root Mean Squared Error)及びMRE(Mean Relative Error)を指標とした。なお、主要な統計解析にはフリーソフトウェアR3.4.2を用いた。

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

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

n: サンプル葉数

表1 トマト「りんか409」の個葉面積推定に供試したサンプル葉の特性

採取地 <sup>1)</sup>	作型 <sup>2)</sup>	調査 葉数	葉長 (cm)				葉幅 (cm)				葉面積 (cm <sup>2</sup> )			
			最小	最大	平均	SD <sup>4)</sup>	最小	最大	平均	SD	最小	最大	平均	SD
農総試	抑制-1 <sup>3)</sup>	207	9	55	38.9	9.2	6	58	39.5	10.6	11.2	1158.1	567.4	264.7
農総試	抑制-2	209	11	54	40.1	9.8	8	57	40.3	11.0	15.7	1144.9	434.5	269.2
農総試	半促成-1	162	12	52	32.1	8.7	8	61	34.5	10.9	17.6	1208.6	583.8	270.1
農総試	半促成-2	164	10	45	31.0	7.5	5	57	33.5	10.3	13.6	1116.7	384.4	232.5
A S C	促成長期	70	11	48	30.8	8.7	7	57	35.9	12.6	14.9	1192.8	415.4	280.2

1) 農総試: 灌水同時施肥栽培、ASC: 養液栽培、いずれも2014~2015年作

2) 抑制-1、抑制-2、半促成-1及び半促成-2: モデル構築及び検証Ⅰ用、促成長期: 検証Ⅱ用

3) 抑制-1及び半促成-1: 東区画から採取、抑制-2及び半促成-2: 西区画から採取

4) SD: 標準偏差

表2 トマト「りんか409」の葉長及び葉幅から個葉面積を推定するモデル比較<sup>1)</sup>

モデル 符号	説明変数 数 種類		確率 <sup>2)</sup> 分布	モデル式 <sup>3)</sup>	モデル式のパラメータ					AIC <sup>4)</sup>
	a	b			c	d	f			
A	1	L	正規	y=aL+b	25.00	-397.07	—	—	—	4626
B	1	W	正規	y=aW+b	22.64	-341.63	—	—	—	4532
C	1	L	正規	y=aL <sup>2</sup> +bL+c	0.23	10.19	-176.34	—	—	4610
D	1	W	正規	y=aW <sup>2</sup> +bW+c	0.35	0.04	-23.30	—	—	4431
E	1	L	正規	Ln(y)=aLn(L)+b	1.98	-0.95	—	—	—	4618
F	1	L	ガンマ	Ln(y)=aLn(L)+b	2.60	-3.18	—	—	—	4487
G	1	W	正規	Ln(y)=aLn(W)+b	2.09	-1.42	—	—	—	4431
H	1	W	ガンマ	Ln(y)=aLn(W)+b	2.18	-1.77	—	—	—	4211
I	2	L, W	正規	y=aL+bW+c	9.52	15.02	-400.28	—	—	4481
J	2	L, W	正規	y=aL+bW+cLW+d	-8.15	1.99	0.47	43.93	—	4325
K	2	L, W	正規	y=aLW+b	0.39	-55.68	—	—	—	4351
L	2	L, W	正規	Ln(y)=aLn(L)+bLn(W)+c	0.79	1.49	-2.09	—	—	4325
M	2	L, W	ガンマ	Ln(y)=aLn(L)+bLn(W)+c	0.85	1.53	-2.46	—	—	4089
N	2	L, W	正規	y=ae <sup>bL</sup> +ce <sup>dW</sup> +f	-448.87	-465.91	305.34	0.03	-414.21	3366

1) サンプル葉 n=742、2分割交差検証

2) 応答変数が従うと仮定した確率分布

3) y: 葉面積、L: 葉長、W: 葉幅、Ln(): ( )内の自然対数値、e: ネイピア数

4) 赤池情報量規準

**試験2 他の4品種に対する個葉面積を推定する回帰モデルの適用性評価**

試験場所は、試験1と同様に農総試の高軒高ハウスとした。供試品種は「桃太郎ヨーク」(タキイ種苗株式会社、京都)、「みそら64」(みかど協和株式会社、千葉)、「あいさか2号(以下、ルネッサンス)」(株式会社サカタのタネ、神奈川)及び「スーパーファースト」(愛三種苗株式会社、愛知)とした。いずれも台木「がんばる根3号」(前述)に接ぎ木して半促成栽培とした。これらの播種・接ぎ木・定植日は試験1(1)アの半促成栽培と同様とした。栽培環境、栽培管理、サンプル採取、調査及び解析の方法は試験1(1)ア、(2)ア及び(3)に準じ、十分に展開した本葉を品種別に230枚ずつ供試した。調査は圃場内の東・西両区画からそれぞれ中庸な3株を抽出し、それらのデータを併せて用いた。試験1で選択されたモデルを用い、複数品種への適用性について5分割交差検証を行った。品種別データセットを葉面積が小さい順に並べて i、ii・・・v の符号を順次割り付け、サブデータセット i ～ v に5分割した。このうち、モデル毎に四つのサブデータセットからパラメータを決定し、残り一つのサブデータセット(テストデータ)で検証した。テストデータ i ～ v を入れ替えながら5回の検証を繰り返し、モデル毎に予測力・精度の平均値を算出した。最良のモデルを選択するため、品種毎に各評価指標をそれぞれ小さい数値から順位付けして評点を付与した。順位毎に上位から1、2、3点を与え、同一順位は同一評点とした。AIC・RMSE・MREの合計評点をもとに総合評価した。

また、葉の形態的特性を品種別に比較するため、品種毎に葉長35～45 cm程度のサンプル葉を30枚ずつ抽出し、複葉の葉軸に着生する小葉数及び頂小葉の長さ・幅を計数及び測定した。

**試験結果**

**試験1 品種「りんか409」を対象とした個葉面積を推定する回帰モデルの構築及び検証**

**(1) サンプル葉の特性**

サンプル葉の基本統計量を表1に示す。モデル構築及び検証I用では、東区画から採取した抑制-1及び半促成-1、並びに西区画から採取した抑制-2及び半促成-2のデータを用いた。供試した葉の大きさは、葉長9～55 cm(平均31.0

～40.1、SD7.5～9.8)、葉幅5～61 cm(平均33.5～40.3、SD10.3～11.0)、葉面積11.2～1208.6 cm<sup>2</sup>(平均384.4～583.8、SD232.5～270.1)であった。両作型から得たデータの扱いについて検討するため、抑制-1及び半促成-1のデータを用いて葉面積を応答変数とし、葉長、葉幅及び作型を説明変数(このうち作型を共変数)とする共分散分析を行った。その結果、作型の主効果は有意でなく(F=0.753、P=0.386)、作型と葉長並びに作型と葉幅との交互作用も認められなかった(F=2.933、P=0.088; F=0.021、P=0.884)。このことから、作型別に得られる回帰モデルを等質とみなし、以後は両作型のデータを併せて交差検証用のサブデータセットとして扱った。このサブデータセットで

表3 トマト「りんか409」における個葉面積推定モデルの検証

モデル 符号	検証 I <sup>1)</sup>		検証 II <sup>1)</sup>	
	RMSE <sup>2)</sup>	MRE <sup>3)</sup>	RMSE	MRE
A	124	0.44	203	0.39
B	109	0.52	117	0.20
C	163	0.42	194	0.37
D	97	0.17	87	0.16
E	126	0.32	188	0.36
F	151	0.24	221	0.38
G	94	0.16	88	0.16
H	95	0.15	94	0.17
I	99	0.55	128	0.21
J	78	0.14	91	0.18
K	82	0.20	101	0.18
L	79	0.13	96	0.17
M	80	0.12	102	0.17
N	97	0.51	83	0.16

- 1) 検証I：サンプル葉 n=742、2分割交差検証  
検証II：サンプル葉 n=70(モデル構築と異なる環境)
- 2) Root Mean Squared Error
- 3) Mean Relative Error

表4 トマト個葉面積推定に供試したサンプル葉の特性<sup>1)</sup>

品種	調査 葉数	葉長 (cm)				葉幅 (cm)				葉面積 (cm <sup>2</sup> )			
		最小	最大	平均	SD <sup>2)</sup>	最小	最大	平均	SD	最小	最大	平均	SD
桃太郎ヨーク	230	13	52	33.8	9.2	6	54	34.0	11.2	8.9	1272.5	381.8	247.0
みそら64	230	11	47	30.1	9.2	6	52	31.1	10.9	8.9	958.3	356.5	243.7
ルネッサンス	230	13	47	31.1	8.2	10	60	36.5	11.5	24.3	1302.7	477.1	307.2
スーパーファースト	230	11	48	30.8	8.7	7	57	35.9	12.6	14.9	1192.8	415.4	280.2

1) いずれも農総試の半促成栽培から採取、2015年作  
2) SD：標準偏差

は、葉長又は葉幅と葉面積との間にそれぞれ正の相関が認められたが(葉長 $r=0.898$ 、葉幅 $r=0.919$ )、葉長と葉幅との間にも高い相関が認められた( $r=0.922$ )。そこで、多重共線性を検出する手法の一つとされるVIF(Variance Inflation Factor $=1/(1-R^2)$ )<sup>8)</sup>を算出した結果、6.7を示した。一方、検証Ⅱのサンプル葉はモデル構築・検証Ⅰ用と異なる栽培環境から入手したが、それらと葉長・葉幅・葉面積のデータ範囲に大きな相違はみられず、回帰モデルの内挿範囲にあった。

## (2) モデルの構築

農総試で得られたデータセットから、表2に示す14種類の葉面積推定モデルA~Nを構築し、候補とした。モデルA・Bは線形単回帰分析、モデルC・Dは二次回帰分析、モデルI~Kは線形重回帰分析を使用した。モデルE~H・L・Mは一般化線形モデル(以下、GLM)を使用してリンク関数をlogとし、応答変数が正規分布又はガンマ分布に従うものと仮定した。モデルNはDannehlら<sup>9)</sup>の報告に準じて非線形回帰分析(指数関数)を使用した。モデル選択の指標に用いたAICは、値が小さくなるに従って予測(推定)に最適なモデルとされる。一つの説明変数(以下、1変数)によるモデルA~Hでは、モデルHのAICが最も小さかった。二つの説明変数(以下、2変数)によるモデルI~Nでは、モデルNのAICが最も小さかった。総じて1変数より2変数のモデルでAICが小さく、1変数を用いた場合は葉長より葉幅を用いたモデルでAICが小さかった。また、GLMにおいては、応答変数をガンマ分布に従うと仮定したモデルのAICが、正規分布に従うと仮定したモデルのそれより小さかった。

## (3) モデルの検証Ⅰ

モデルA~Nについて、交差検証により精度を評価した。その結果を表3に示す。指標に用いたRMSE及びMREの値が小さくなるに従って、推定値と実測値とのずれ(誤差)が小さ

いことを示す。1変数では、モデルD・G・HのRMSE及びMREが同程度に小さかった。2変数では、モデルJ・L・MのRMSE及びMREが小さかった。2変数モデルJ・L・MのRMSE及びMREは、1変数モデルD・G・Hのそれに比べて小さい値を示した。また、2変数モデルでは、RMSE又はMREが最小のモデルは、AICが最小のモデルと一致しなかった。

## (4) モデルの検証Ⅱ

モデルA~Nについて、モデル構築用とは異なる栽培環境から入手したデータセットを用いて精度を評価した(表3)。1変数ではモデルD・G・H、2変数ではモデルJ・L・NのRMSE及びMREが小さかった。ただし、2変数モデルJ・L・NのRMSE及びMREは、検証ⅠとⅡとの間で数値変化が大きかった。一方、1変数モデルD・G・Hのそれは、検証ⅠとⅡとの間で数値変化が小さかった。結果的に、試験1ではモデルD・G・Hを選択した。その根拠は考察に記述する。

表5 トマト個葉面積推定モデルにおける変数間の関係<sup>1)</sup>

品種	相関係数			VIF <sup>2)</sup>
	A-L	A-W	L-W	L-W
りんか409	0.898	0.919	0.922	6.7
桃太郎ヨーク	0.901	0.914	0.951	10.4
みそら64	0.921	0.921	0.953	10.9
ルネッサンス	0.899	0.929	0.936	8.0
スーパーファースト	0.870	0.916	0.951	10.4

1) A: 葉面積、L: 葉長、W: 葉幅  
りんか409: n=369、その他4品種: n=230

2) Variance Inflation Factor

表6 トマト4品種における葉幅からの個葉面積推定モデル比較<sup>1)</sup>

品種	モデル符号	モデル式のパラメータ			AIC <sup>2)</sup>	RMSE <sup>3)</sup>	MRE <sup>4)</sup>
		a	b	c			
桃太郎ヨーク	D	0.50	-9.96	82.61	2103	72	0.16
	G	2.49	-3.02	—	2100	72	0.16
	H	2.17	-1.86	—	1995	77	0.16
みそら64	D	0.48	-7.99	57.77	2107	84	0.19
	G	2.42	-2.72	—	2105	84	0.18
	H	2.21	-1.93	—	2020	88	0.18
ルネッサンス	D	0.51	-9.27	65.44	2185	90	0.13
	G	2.45	-2.81	—	2184	90	0.14
	H	2.44	-2.76	—	2033	90	0.14
スーパーファースト	D	0.49	-10.52	91.30	2139	80	0.19
	G	2.53	-3.25	—	2135	80	0.17
	H	2.17	-1.89	—	2039	86	0.17

1) いずれもサンプル葉 n=230、5分割交差検証、2015年作

2) 赤池情報量規準

3) Root Mean Squared Error

4) Mean Relative Error

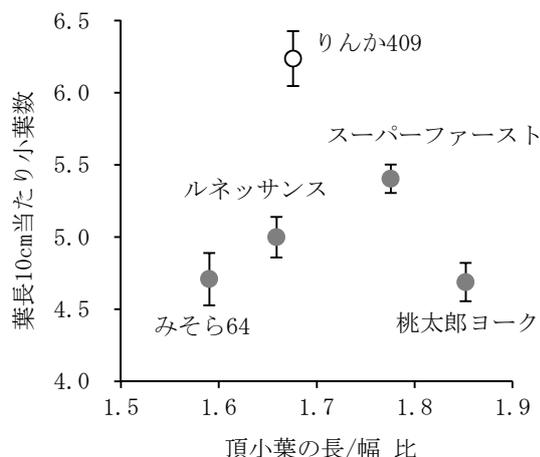


図2 供試品種別の葉の形態的特性  
エラーバーは標準誤差を示す(n=30)

表7 評価指標AIC・RMSE・MREに基づく  
個葉面積推定モデルの総合評価

品種	モデル 符号	評点 <sup>1)</sup>			
		AIC <sup>2)</sup>	RMSE <sup>3)</sup>	MRE <sup>4)</sup>	合計
桃太郎ヨーク	D	3	1	1	5
	G	2	1	1	4
	H	1	3	1	5
みそら64	D	3	1	3	7
	G	2	1	1	4
	H	1	3	1	5
ルネッサンス	D	3	1	1	5
	G	2	1	2	5
	H	1	1	2	4
スーパー ファースト	D	3	1	3	7
	G	2	1	1	4
	H	1	3	1	5

- 1) 表6をもとに、品種毎に小さい数値から順に1~3点を付与した。同一数値は同一評点とした。合計評点が小さいモデルほど有望と判断する。
- 2) 赤池情報量規準
- 3) Root Mean Squared Error
- 4) Mean Relative Error

試験2 他の4品種に対する個葉面積を推定する回帰モデルの適用性評価

(1) サンプル葉の特性

品種別サンプル葉の基本統計量を表4に示す。供試した葉の大きさは、葉長11~52 cm(平均30.1~33.8、SD8.2~9.2)、葉幅6~60 cm(平均31.1~36.5、SD10.9~12.6)、葉面積8.9~1302.7 cm<sup>2</sup>(平均356.5~477.1、SD243.7~307.2)であった。モデルに用いた変数相互の関係性を表5に示す。葉長、葉幅及び葉面積の間には、それぞれ正の相関が認められた。品種別に葉長と葉幅との間で算出したVIFは8.0~10.9を示した。

供試品種別の葉の形態的特性を図2に示す。試験1に用いた「りんか409」では、葉長10 cm当たりの小葉数が最も多かった。一方、「桃太郎ヨーク」及び「みそら64」では、葉長10 cm当たりの小葉数が少なかったが、前者は頂小葉が細長い形状を、後者は幅広い形状を示す傾向にあった。

(2) モデルの適用

試験1で選択したモデルD・G・Hについて、品種別のデータセットから新たに算出したパラメータ及びモデル評価の指標を表6に示す。品種にかかわらず、AICはモデルHで最も小さく、RMSE及びMREはモデルGで安定して小さかった。表7には、順位に基づいて付与されたAIC・RMSE・MREの評点を示す。合計評点を4品種で平均した結果、Dが6.0点、Gが4.3点、Hが4.8点となり、評点が小さい上位2モデルはG・Hであった。

モデルGの検証例を図3に示す。モデル構築に用いていない検証IIのデータセットは、95%予測区間内に概ね収まった。実測葉面積と推定葉面積とをプロットした散布図では、原点を通る傾き1の直線に沿って上下に分布した。モデルHでも、同様な傾向が認められた。

考 察

本研究では品種「りんか409」を用い、葉長及び葉幅を説明変数とする個葉面積の推定において、候補となる14種類のモデルを構築した。モデル構築と同環境又は異なる環境から得たデータセットを用いて検証したところ、モデル構築時にAIC最小のモデルは、検証時にRMSE及びMRE最小のモデルと必ずしも一致しなかった。そこで本研究では、予測力及び精度の両面から好適なモデルを選択した。その結果、モデル構築時から2回の検証時まで含めた安定性を考慮すると、1変数によるモデルD・G・Hが好適と判断される。これら1変数モデルは、いずれも葉幅を説明変数としている。葉面積との相関係数においても、品種にかかわらず葉長より葉幅で高い傾向がみられることから、葉幅は葉長に比べて葉面積を反映しやすいものと考えられる。1変数モデルD・G・Hは、2回の検証を通して同程度に高い精度を保持した。一方、2変数モデルは1変数モデルに比べてAICが小さく、予測力が高いと評価されたものの、モデル構築時と異なるデータセットを用いた検証IIで精度が低い傾向を示した。データセットによって振れ幅が大きい2変数モデルの不安定さは、説明変数間多重共線性に起因するものと考えられた。多重共線性は、説明変数間に強い相関がある重回帰モデルに生じやすく、信頼できるモデルの構築を妨げるとされる<sup>8,9)</sup>。葉長と葉幅の間には高い正の相関が認められた。多重共線性を検出するための一手法として、Akinwandeら<sup>9)</sup>はVIF=10以上のときに多重共線性の

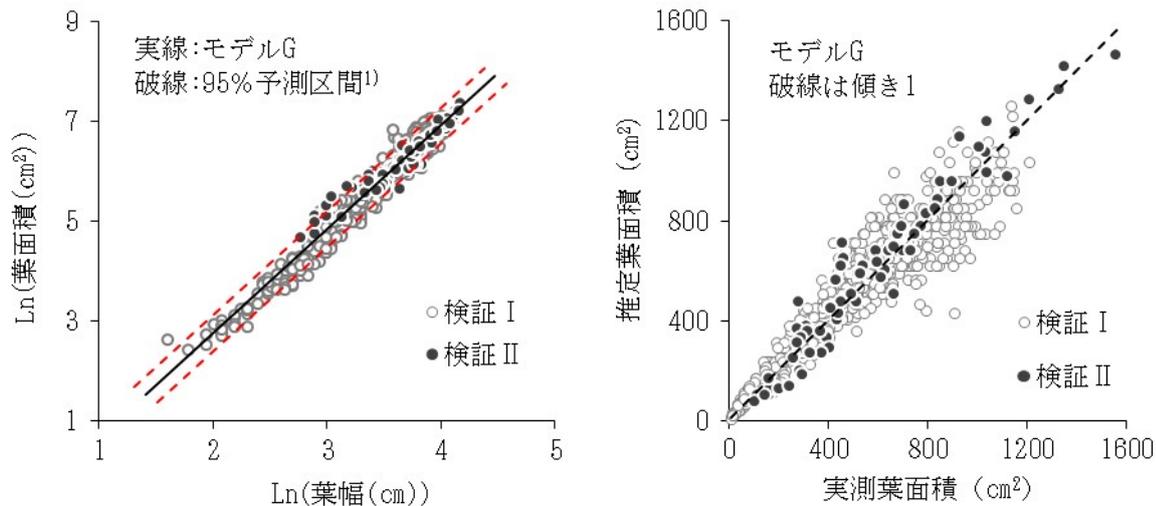


図3 トマト「りんか409」におけるモデルGを用いた個葉面積推定の検証

1) 95%予測区間の上下限： $\text{Ln}(y) \approx a \text{Ln}(W) + b \pm 0.354$

$y$ ：葉面積、 $W$ ：葉幅、 $\text{Ln}$ ：自然対数、 $a$ 及び $b$ ：パラメータ

危険性が高く、5～10のときにその可能性が強いと指摘している。「りんか409」の検証Iに用いたサブデータセットではVIF=6.7を、試験2で扱った4品種ではVIF=8.0～10.9を示した。このことから、葉長及び葉幅を同時に説明変数とするモデルは、多重共線性を内包しているものと考えられる。更に、モデルD・G・Hの適用性について、「りんか409」とは異なる4品種で検証した。その結果、品種にかかわらずG又はHの評価が高かった。以上の結果、予測力・精度が最も安定して高く、かつ適用範囲が広いモデルはG又はHと判断される。

既往の報告では、SchwarzとKläring<sup>2)</sup>が中玉トマト品種を用い、べき乗関数(アロメトリー式： $y = aW^b$ )によるモデルを最良として選択した。この式を変形すれば対数線形関係を示すことから、本研究のモデルGで近似できる。このほか、BlancoとFolegatti<sup>3)</sup>は本研究のモデルD・Kを、Villacampaら<sup>4)</sup>はモデルI・Kを、Dannehlら<sup>5)</sup>はモデルNを最良と報じている。Küçükönderら<sup>6)</sup>は、従来の統計解析ソフトを用いた回帰分析であればモデルLを最良とするが、人工ニューラルネットワークを導入することで更に高度なモデルを構築できることを示唆した。本研究で選択されたモデルは、SchwarzとKläring<sup>2)</sup>の結果と概ね合致した。ただし、本研究において日本の大玉トマト5品種で構築したモデルG・Hの傾きは2.09～2.53であったが、SchwarzとKläring<sup>2)</sup>により海外の中玉トマト品種で構築されたモデルの傾き(対数線形に変形後)は1.67と、日本の大玉トマト品種に比べて小さい値を示した。日本の5品種を比べても葉の形態(葉長当たり小葉数・頂小葉の形状)に差異が認められることから、モデル適用時には、品種毎に改めてパラメータの決定が必要と思われた。また、SchwarzとKläring<sup>2)</sup>は、肥培管理又は測定日が異なってもモデルは有効であると報じており、本研究の検証結果を支持した。このように複数の先行研究が海外でみられるものの、①多重共線性の

指摘、②GLMによる解析は見当たらない。多重共線性については、前述した。一方、GLMについては、生態学・水産学等の研究分野で多く利用される解析手法で、従来の線形回帰分析を拡張して正規分布以外の多様な確率分布を仮定することができる。本研究のモデルF・H・Mで検討を試みたガンマ分布は、非負の連続値を変数にするとき、例えば草丈・種子重・花重・牧草地の草量等の分析に有効とされる<sup>10-12)</sup>。トマトの葉面積がガンマ分布に適合するか否かは明らかでないが、本研究でガンマ分布を仮定したモデルは、正規分布のそれに比べて精度は低かったものの、AICは顕著に小さかった。

葉面積の測定には、一般に高価な葉面積計を必要とし、加えて煩雑な作業を伴う。特に、トマトは羽状複葉を呈することから、葉面積測定時には、捻転・湾曲した小葉が重ならないように1枚ずつ伸ばし広げる必要がある。本研究では、測定作業に1葉当たり20～30分を要することもあった。そこで、本研究では簡易な計測により非破壊で個葉面積を推定する有用なモデルを構築した。高価な機器の設置・携行を必要とせず、容易に取り組むことができる。一連の検証結果から、選択されたモデルは、栽培環境が異なっても同一品種であれば同一パラメータを利用できること、パラメータの調整により他の日本の品種に対しても適用可能であることを示唆した。葉面積を反映する最適測定部位は葉幅と考えられ、特に葉幅のみを用いる推定モデルG又はHは、高い頑強性・汎用性を有するものと推察される。また、2変数を用いても精度の大幅な向上はみられず、データセットによっては、むしろ推定結果が不安定であった。生産現場での測定作業を考慮すると、1変数モデルで葉幅のみを測定した方が明らかに負担軽減、時間短縮となり、葉を損傷するリスクも軽減することができる。

施設栽培で環境制御機器を導入して光合成の最大化を実現する上で、LAIの把握は重要である。生産現場用の技術

として、齊藤<sup>13)</sup>はLAIの構成要素となる着葉数に着目し、「トマトの場合、葉がおおよそ13~15枚でLAI $\approx$ 1と考えればよい」とする圃場管理の目安を紹介している。そこで、この数値をもとに「あいち型植物工場」<sup>14)</sup>の栽植密度3.0株 m<sup>-2</sup>で試算したところ、この方法は個葉面積222~256 cm<sup>2</sup>程度の葉が着生している条件下で限定的に成立する。このとき、モデルGを用いて逆推定される「りんか409」の葉幅は26~28 cmであり、生産現場はもとより本研究のサンプル葉に比べてかなり小さめの葉を想定していることがわかる。従って、この方法を用いるならば、葉の大きさに応じてLAI $\approx$ 1に相当する葉数が適宜決定されるべきであろう。一方、本研究では、構成要素のうち個葉面積に着目した。本研究の開発手法を用いることにより、任意の圃場の任意の葉で個葉面積を推定することができる。生育環境又は生育ステージにより、葉幅の測定値が同一でも葉面積にばらつきが認められるものの、生産現場でのLAI推定を補助する技術になり得るものと思われる。個葉面積を推定することができれば、生産現場で簡易なLAI把握が可能になる。今後は、LAI推定に効果的な葉幅調査方法(有効な調査葉数・調査位置等)について検討する必要があると考えられる。

**謝辞**：本研究の遂行に当たり、JAあいち経済連の須原健氏には葉面積測定で、ASCの中神康晴氏にはサンプル葉の提供で御協力をいただいた。ここに感謝の意を表す。

## 引用文献

1. 東出忠桐. 農業技術大系野菜編2トマト. 農山漁村文化協会. 東京. p. 基560の4-17(2014)
2. Schwarz, D. and Kläring, H. P. Allometry to estimate leaf area of tomato. *J. Plant Nutr.* 24, 1291-1309(2001)
3. Blanco, F. F. and Folegatti, M. V. A new method for estimating the leaf area index of cucumber and tomato plants. *Hortic. Bras.* 21(4), 666-669(2003)
4. Villacampa, Y., Navarro-Gonzalez, J. F., Reyes, J. A. and Sastre-Vazquez, P. Numerical and regression models for the leaf area of tomato seedlings. *WIT Transactions on Ecology and The Environment.* 175, 3-10(2013)
5. Dannehl, D., Rocks, T. and Schmidt, U. Modelling to estimate the specific leaf area of tomato leaves('Pannovy'). *Acta Hort.* 1099, 79-86(2015)
6. Kükükönder, H., Boyacı, S. and Akyüz, A. A modelling study with an artificial neural network: developing estimation models for the tomato plant leaf area. *Turk. J. Agric. For.* 40, 203-212(2016)
7. 中野明正, 安場健一郎, 東出忠桐. オランダと日本トマト品種の形態的特徴と多収性との関連. *農業および園芸.* 87(10), 993-997(2012)
8. 北野聡. 生物・社会調査のための統計解析入門: 調査・研究の現場から(その6). *農業土木学会誌.* 73(1), 39-44(2005)
9. Akinwande, M. O., Dikko, H.G. and Samson, A. Variance inflation factor: As a condition for the inclusion of suppressor variable(s) in regression analysis. *Open Journal of Statistics.* 5, 754-767(2015)
10. 久保拓弥. データ解析のための統計モデリング入門. 岩波書店. 東京. p. 1-267(2012)
11. 大東健太郎. 線形モデルから一般化線形モデル(GLM)へ. *雑草研究.* 55(4), 268-274(2010)
12. 堤道生, 塩見正衛. ガンマ分布を用いた空間分布解析. *日本草地学会誌.* 49, 275-279(2003)
13. 齊藤章. ハウスの環境制御ガイドブック. 農山漁村文化協会. 東京. p. 60-65(2015)
14. 愛知県農業総合試験場. あいち型植物工場マニュアル(トマト編). 愛知県農業総合試験場. 愛知. p. 1-25(2016)