

## 画像解析を利用したトマト花色簡易評価に基づく 花器構成部位別の着果率予測モデル

樋江井清隆<sup>1)</sup>・小川理恵<sup>1)</sup>・大川浩司<sup>1)</sup>

**摘要:** トマトの生育診断に資するため、画像解析により花色を数値評価し、花色評価値から着果率を予測するモデルについて検討した。自然光下でデジタルカメラを用いて色見本及び開花花房を同一画面に写し込み、画像処理ソフトで花色を数値化した。花色は、花領域全体(花の黄色部分)、花冠向軸面、花冠背軸面、葯筒に分けて評価した。2値化処理で抽出した花領域全体には、花冠向軸面、花冠背軸面、葯筒が含まれた。花色評価値から着果率を予測するため、評価部位別に一般化線形モデルで解析した。モデルの予測精度は、葯筒で最も高かった。しかし、葯筒を評価したモデルでも、予測値と実測値との相関係数は0.481にとどまった。従って、花色のデータのみによる着果率予測は難しいことが示唆された。

**キーワード:** 画像解析、トマト、花色、着果率、数値評価、一般化線形モデル

## Models of Predicting Fruit-Set Percentage Based on Tomato Flower Color Simple Evaluation for Each Constituent Part of Flower Organ using Image Analysis

HIEI Kiyotaka, OGAWA Rie, and OHKAWA Hiroshi

**Abstract:** To contribute to the growth diagnosis of tomato plants, we numerically evaluated the flower color and examined models that predict fruit-set percentage based on flower color evaluation (FCE) values. A tomato flowering cluster and a color scale were photographed on the same screen using a digital camera under natural light conditions. The flower color was quantified through image processing software. The whole flower region (all yellow parts of the flower organ) was divided into adaxial corolla surface, abaxial corolla surface, and anther cone, the flower color was evaluated separately. Binarization was used to extract the whole flower region, which included the adaxial corolla surface, abaxial corolla surface, and anther cone. Data acquired were separately analyzed for each part using a generalized linear model to predict fruit-set percentage based on FCE values. Consequently, the model evaluating anther cone had the highest prediction accuracy. However, even though the model evaluating the anther cone was applied, the correlation coefficient between predicted and observed values was not more than 0.481. Hence, difficulty of predicting fruit set by flower-color data alone was suggested.

**Key Words:** Image analysis, Tomato, Flower color, Fruit-set percentage, Numerical evaluation, Generalized linear model

---

本研究の一部は園芸学会平成31年度春季大会(2020年3月)において発表した。

<sup>1)</sup>園芸研究部

(2022.9.7受理)

## 緒言

トマト栽培において、栄養状態又は温度・光等の生育環境の不良は、花の素質(花質)を低下させ、結実を不良にすることが知られている<sup>1)</sup>。青木<sup>2)</sup>及び斎藤<sup>3)</sup>は、トマトの花色が生育状況を反映していることをそれぞれに指摘しており、生産現場でも生育診断指標として用いられる事例がある<sup>4)</sup>。しかし、生育診断の視点で花色を扱った研究はほとんど見当たらない。その理由として、植物体の表面は平面でなく単一色でもないため分光測色計、色彩計又は色差計の利用に適さないこと<sup>5)</sup>、変化しやすい自然光下では、画像解析を用いても厳密な定量は困難なこと<sup>6)</sup>が挙げられる。こうした中、筆者らは花質のうち花色に着目し、ハウス内の *in situ* で取得したデジタル画像をもとに花色を簡易的に数値評価する方法を考案するとともに、花冠向軸面の花色評価値と着果率との間に有意な相関を見出した<sup>7)</sup>。

そこで本研究では、「生育診断の一環として定期的に花色を数値評価することにより、花色の変化を検出することで草勢低下や生育環境悪化等に伴う着果の不安定化を早期に察知できる」ものと仮説を立てて、以下のように検討した。生育診断用のアプリケーションソフト開発を見据え、トマトの開花花房を撮影した画像から花領域(花の黄色部分)のみ抽出する工程を新たに導入し、前報<sup>7)</sup>の花色簡易評価法を適用した。そして前述の仮説を検証するため、一般化線形モデルを用いて花色と着果率との関係について数式化を試みた。これらの結果、花色について生育診断に資する知見が得られたので報告する。

## 材料及び方法

### 1 画像の取得方法

#### (1) 供試資機材及び撮影方法

撮影用のカメラには、レンズ一体型のコンパクトデジタルカメラ(FE-330、800万画素、撮像素子1/2.3型CCD、オリンパス株式会社、東京)を用いた。色見本には、水稻用の葉色カラスケール(富士平工業株式会社、東京)を用いた。この表

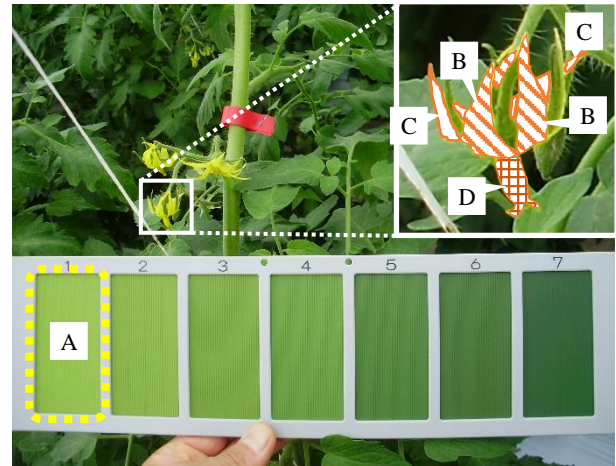


図1 トマト花色簡易評価における撮影構図  
注) 右上は花の拡大図と花器構成部位の一例  
A:使用した色見本の淡い黄緑色部分(点線内)  
B:花冠向軸面(斜線部分)、C:花冠背軸面(白色部分)  
D:葯筒(網掛部分)

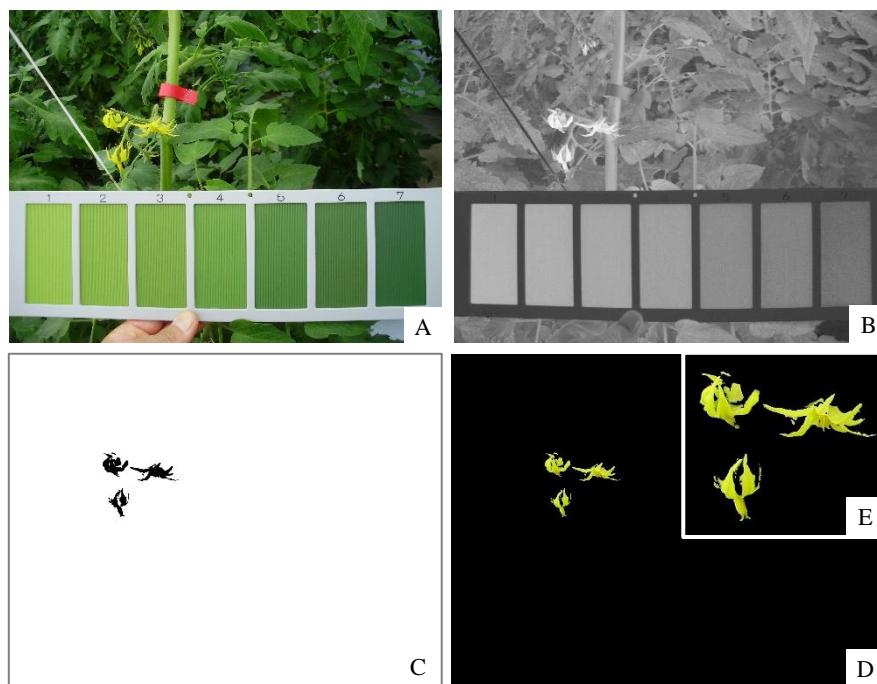


図2 画像処理によるトマト花領域の抽出

A:原画像(32-bit color)、B:b\*画像(8 bit)、C:2値画像  
D:花領域抽出画像(=A画像-C画像)、E:抽出された花領域の拡大図

示色は淡い黄緑色～濃緑色の7段階で、このうちトマト花色に最も近似した淡い黄緑色部分のみを利用した(図1)。

カメラはAUTOモードで使用し、ズーム機能を用いずに距離約30 cmからトマトの花房及び色見本を同一画面に写し込んだ(図1)。このとき、撮影者がカメラ及び色見本を手で保持し、カメラ光軸と色見本平面とが直角をなすように撮影した。光源は自然光(ハウス内に透過した太陽光)とした。撮影時刻は毎回9時30分～10時とし、屋外日射量500 W m<sup>-2</sup>以上の光条件では遮光カーテン(遮光率30%、SLS30ハーモニー、株式会社誠和、栃木)を展張した。太陽と被写体との位置関係は、常に順光、横光又は斜光とし、逆光を避けた。

## (2) 試験場所

試験場所は、愛知県農業総合試験場内の高軒高ハウス(266 m<sup>2</sup>、軒高3.5 m、POフィルム被覆)とした。

## 2 花領域の抽出方法

画像処理には、フリーソフトウェアImageJ1.52s<sup>8)</sup>を用いた。2値化処理による花領域抽出の手順を図2に示した。デジタルカメラで取得した原画像(32-bit color、図2-A)をL\*a\*b\*画像(8 bit)に変換後、b\*画像(図2-B)において花と背景(茎葉等)とを分離できるb\*値の閾値を手動で選定し、2値画像(図2-C)を得た。なお、閾値は画像ごとに若干異なり、190～210程度であった。次に、同ソフトウェアの演算機能を利用し、原画像及び2値画像のそれぞれ同位置にあるピクセル値について、原画像から2値画像を減算処理することで花の黄色部分(以下、花領域)のみを抽出した(図2-D)。この方法では、同一花房内にある開花1～5日後に当たる複数の花が一括して抽出された。萎凋又は退色した花は抽出されなかったものの、前報<sup>7)</sup>で評価対象としなかった開花4、5日後の花は含まれた。

## 3 花色の簡易評価法

前報<sup>7)</sup>の花色簡易評価法に準じ、以下のとおりとした。ソフトウェアImageJ1.52s上で取得画像をL\*a\*b\*画像に変換後、解析対象(花及び色見本)を手動で領域選択し、領域内の平均a\*値、b\*値を計測した。また、a\*値及びb\*値を用いてC\*(Chroma)値を次式により算出した<sup>9)</sup>。これらa\*値、b\*値及びC\*値は撮影条件に影響を受け難く、かつトマトの花色評価に有効であることを前報<sup>7)</sup>で確認している。

$$C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2}$$

花色の評価には、花の色計測値と色見本の色計測値との差分を“Δ値”と定義して用いた。例えばa\*値の場合、Δa\* = a\*<sub>花</sub> - a\*<sub>色見本</sub>と定義した(Δa\*: a\*による花色評価値、a\*<sub>花</sub>: 花のa\*値、a\*<sub>色見本</sub>: 色見本のa\*値)。花色評価項目(Δ値)はΔa\*、Δb\*及びΔC\*の3種類とした。

花色評価の供試部位は、花領域全体及びその領域を構成する3部位(花冠向軸面、花冠背軸面、葯筒)の計4種類とした(図1-右上)。花領域全体は、2値化処理で抽出した花領域(花冠向軸面、花冠背軸面及び葯筒が混在、図2-D及びE)をそのまま用いており、同一花房内で同時に抽出された2～4花を一括して扱った。また、花領域全体について、画像に占める部位別面積比を調査するため、前述の画像処理ソフトを用いて手動で部位別に領域選択し、領域内のピクセル数をカウントした。本研究で扱った画像の撮影角度は、生育ステージ及び花房の着生状態に応じて花房の斜め下方から、水平方向から、斜め上方からとする3種類のいずれかであった。このため、部位別面積比の調査には、上記三つの角

表1 画像解析を利用した花色簡易評価法によるトマト花器構成部位別の花色評価値<sup>1)</sup>

試験年次	作型	花房位置	開花日 <sup>2)</sup>	花色評価値																			
				花領域全体 <sup>3)</sup>			花冠向軸面			花冠背軸面			葯筒										
				Δa*	Δb*	ΔC*	Δa*	Δb*	ΔC*	Δa*	Δb*	ΔC*	Δa*	Δb*	ΔC*								
2019	半促成	第2	3/15	9.8	15.9	10.6	7.2	ab <sup>5)</sup>	25.1	a	20.1	a	11.7	b	7.3	ab	1.8	ab	20.8	ab	11.3	3.5	a
2019	半促成	第6	4/19	8.4	18.3	12.9	6.5	ab	25.7	a	20.7	a	11.7	b	6.6	ab	0.9	ab	16.5	abc	17.3	9.9	a
2018	半促成	第6	4/1	8.3	18.9	14.3	5.7	ab	26.2	a	22.1	a	10.7	b	10.3	a	5.6	a	13.9	c	21.0	15.0	a
2019	抑制	第1	9/9	8.4	18.8	13.7	7.4	ab	21.2	ab	16.2	ab	15.1	ab	-4.5	ab	-10.6	ab	17.3	abc	14.0	6.6	a
2019	半促成	第4	4/7	4.6	17.1	11.9	7.0	ab	23.6	ab	18.9	ab	8.8	b	6.7	ab	1.2	ab	21.6	a	9.2	1.4	b
2019	抑制	第6	10/17	8.4	19.6	14.4	7.6	ab	22.0	ab	17.0	ab	12.3	ab	8.2	ab	2.4	ab	16.7	abc	17.0	9.8	a
2019	抑制	第2	9/13	7.7	19.5	14.4	6.6	ab	23.5	ab	18.6	ab	12.8	ab	2.6	ab	-3.2	ab	15.1	bc	16.3	9.3	a
2018	抑制	第6	10/13	8.0	21.7	16.4	6.7	ab	25.8	a	20.7	a	10.8	b	9.9	a	4.5	a	13.3	c	20.8	14.1	a
2019	抑制	第3	9/23	8.3	19.2	14.6	5.5	b	24.3	ab	20.0	a	14.2	ab	0.8	ab	-4.8	ab	14.1	c	18.9	12.5	a
2019	抑制	第5	10/8	8.0	19.6	14.4	7.5	ab	21.8	ab	16.7	ab	12.2	ab	5.3	ab	-0.4	ab	14.2	c	23.3	16.3	a
2018	抑制	第5	10/1	16.1	21.6	15.9	7.6	ab	21.3	ab	16.2	ab	23.7	a	-3.9	ab	-9.9	ab	16.6	abc	9.4	11.7	a
2019	抑制	第4	9/30	7.5	17.7	13.1	6.7	ab	21.6	ab	17.0	ab	11.8	ab	4.4	ab	-0.9	ab	16.1	abc	14.1	7.3	a
2018	抑制	第3	9/8	9.3	17.4	11.9	8.5	a	18.8	b	13.3	b	16.0	ab	-5.9	b	-12.4	b	11.5	c	20.7	14.3	a
一元配置分散分析 <sup>4)</sup>				n.s.	n.s.	n.s.	*	**	**	*	**	**	**	**	**	n.s.	*						

1) いずれも5花房の平均値を示す(n=5)

2) 花色を調査した5花房当たり10花の中央値を示す

3) 花の黄色部分(花弁向軸面、花冠背軸面、葯筒が混在)

4) \*\*:1%水準で有意差あり、\*:5%水準で有意差あり、n.s.:有意差なし

5) 異なる英字間にはTukeyHSD法により5%水準で有意差あり

度からそれぞれ2画像ずつ、併せて6画像を無作為に選出して用いた。

4 花器構成部位別にみる花色評価値と開花数及び着果程度との関係(試験1)

(1) 調査規模

本報では、表1に示した2018年及び2019年における2作型の13花房について、各年次・作型当たり5株を選定して調査した。つまり、調査花房数は計65花房(=13花房×5株)であった。半促成栽培では、2018年作の第6花房及び2019年作の第2、4、6花房(いずれも3~4月開花)、抑制栽培では、2018年作の第3、5、6花房及び2019年作の第1~6花房(いずれも9~10月開花)を対象とした。

(2) 花色評価

花領域全体については、1花房当たり撮影日が異なる2画像を花色評価に供し、2画像の平均値を当該花房の代表値とした。調査花房の基部にはビニルテープでマーキングし、1~3日ごとに同一花房を継続して撮影することで各花の開花日を把握した。花冠向軸面、花冠背軸面及び葯筒については、花領域全体で用いた画像の中から開花1~3日後の花を1花房当たり2花(計10花)選定し、花色評価に供した。選定した花は、同一花房内で開花日が異なる2花で、その平均値を当該花房の代表値とした。結果的に、収集した画像データの中から全65花房当たり130画像を解析した。

花領域全体は前述のとおり半自動で抽出したが、花器構成部位別は以下のとおり手動で抽出した。ソフトウェアの領域選択機能を利用し、花領域全体の画像をもとに評価対象部位の外縁をフリーハンドで囲み、領域指定して解析した。

(3) 開花数及び着果数

表2 供試花房の花(果)房当たり開花数及び着果程度<sup>1)</sup>

試験年次	作型	花房位置	開花日 <sup>2)</sup>	花(果)房当たり		
				開花数	着果数	着果率(%)
2019	半促成	第2	3/15	5.4	5.4 abcd <sup>3)</sup>	100.0 a
2019	半促成	第6	4/19	10.8	9.2 a	85.2 ab
2018	半促成	第6	4/1	6.4	5.4 abcd	84.4 abc
2019	抑制	第1	9/9	7.2	6.0 abc	83.3 abc
2019	半促成	第4	4/7	9.6	7.8 ab	81.3 abc
2019	抑制	第6	10/17	7.2	5.6 abcd	77.8 abc
2019	抑制	第2	9/13	10.8	7.4 abc	68.5 abc
2018	抑制	第6	10/13	9.4	5.6 abcd	59.6 abc
2019	抑制	第3	9/23	7.0	3.8 bcd	54.3 abc
2019	抑制	第5	10/8	7.6	3.6 bcd	47.4 abc
2018	抑制	第5	10/1	10.8	4.6 abcd	42.6 bc
2019	抑制	第4	9/30	6.8	2.6 cd	38.2 c
2018	抑制	第3	9/8	7.8	0.6 d	7.7 d
一元配置分散分析 <sup>3)</sup>				n.s.	**	**

1) いずれも5花房(果房)の平均値を示す(n=5)  
 2) 花色を調査した5花房当たり10花の中央値を示す  
 3) \*\*:1%水準で有意差あり、\*:5%水準で有意差あり、n.s.:有意差なし(着果率は逆正弦変換後に統計処理した)  
 4) 異なる英字間には TukeyHSD 法により5%水準で有意差あり

調査花房について、花房当たり開花数及び摘果前の果房当たり着果数(開花後に直径10 mm以上に肥大した果実数)を記録した。

(4) 耕種概要

供試品種には、「りんか409」(株式会社サカタのタネ、横浜)を台木「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。供試作型は半促成栽培(播種2017年11月14日、接ぎ木12月11日、定植2018年1月19日;播種2018年11月20日、接ぎ木12月15日、定植2019年2月1日)及び抑制栽培(播種2018年6月22日、接ぎ木7月10日、定植7月27日;播種2019年7月1日、接ぎ木7月18日、定植8月5日)とした。着果促進のため、いずれの花房にも花房当たり3~5花が開花した時点で4-CPA液剤(トマトーン、石原産業株式会社、大阪)を100倍に希釈して噴霧した。更に着果安定のため、着果を確認後、いずれも果房当たり最多で4果を残して摘果した。供試したトマトの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とし、栽植様式は株間20 cm×うね幅

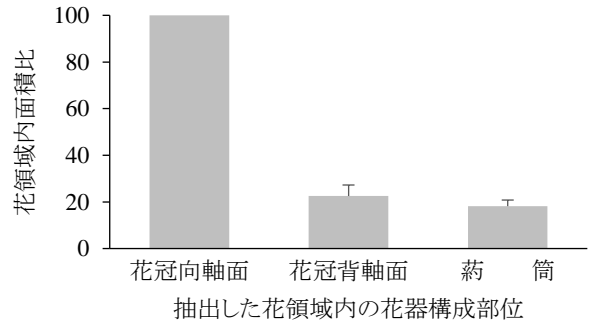


図3 画像処理により抽出した花領域内の構成部位別面積比  
 注) 花冠向軸面のピクセル数を100とした相対値  
 エラーバーは標準誤差 (n=6)

表3 トマト花器構成部位別の花色評価値と開花数及び着果程度との関係

評価部位	開花・着果の状況	相関係数 <sup>1)</sup>		
		Δa*	Δb*	Δc*
花領域全体 <sup>2)</sup>	開花数	-0.074	0.095	0.052
	着果数	-0.088	-0.011	-0.030
	着果率	-0.026	-0.037	-0.020
花冠向軸面	開花数	0.104	0.064	0.030
	着果数	-0.033	0.288 *	0.269 *
	着果率	-0.172	0.367 **	0.371 **
花冠背軸面	開花数	-0.055	0.037	0.021
	着果数	-0.167	0.249 *	0.243
	着果率	-0.158	0.299 *	0.307 **
葯筒	開花数	-0.073	0.148	0.132
	着果数	0.305 *	-0.092	-0.201
	着果率	0.436 **	-0.259 *	-0.370 **

1) n=65、無相関検定により \*\* :1%水準で有意、\* :5%水準で有意  
 2) 花の黄色部分(花弁向軸面、花冠背軸面、葯筒が混在)

表4 トマト花色評価に基づく着果率予測モデルにおける説明変数間の多重共線性検討

評価部位	相関係数 <sup>1)</sup>			VIF <sup>2)</sup>		
	$\Delta a^* - \Delta b^*$	$\Delta a^* - \Delta C^*$	$\Delta b^* - \Delta C^*$	$\Delta a^* - \Delta b^*$	$\Delta a^* - \Delta C^*$	$\Delta b^* - \Delta C^*$
花領域全体 <sup>2)</sup>	0.138	0.094	0.984	1.0	1.0	30.8
花冠向軸面	-0.666	-0.763	0.987	1.8	2.4	37.5
花冠背軸面	-0.500	-0.511	0.998	1.3	1.4	251.3
葯筒	-0.694	-0.802	0.890	1.9	2.8	4.8

1) n=65

2) Variance Inflation Factor、10 &lt; VIF: 多重共線性の可能性あり

180 cmで、1株ごと交互に振り分けて誘引した。施肥には圃試処方と同一組成の液肥を用い、生育に応じて株当たり窒素50～150 mg d<sup>-1</sup>を施用した。この液肥には微量元素(OATハウス5号、OATアグリオ株式会社、東京)を4万倍に希釈して添加した。このほか、栽培管理及び防除管理は当場の慣行法に準じた。

### 5 花色評価値に基づく着果率予測モデル(試験2)

試験1で取得したデータセットをもとに、一般化線形モデルで解析した。説明変数に花色評価値( $\Delta a^*$ 、 $\Delta b^*$ 、 $\Delta C^*$ )を、応答変数に花(果)房当たり着果率を用い、応答変数が従う確率分布を二項分布と仮定し、リンク関数をロジット関数とした。検討したロジスティック回帰モデル<sup>10,11)</sup>を次に示す。

$$\text{Ln}\left(\frac{p}{1-p}\right) = \alpha + \beta\Delta a^* + \gamma\Delta b^* + \delta\Delta C^*$$

花(果)房当たり着果率p=着果数/開花数

Ln: 自然対数  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 、 $\delta$ : パラメータ

説明変数の選択には総当たり法を用い、評価部位別に7種類のモデルA～Gを導出した。その後、赤池情報量規準(以下AIC)によりAIC最小のモデルを花器構成部位別に選定した。これらモデルを適用して花色評価値から花(果)房当たり着果率を予測することにより、生育診断に有効な花色評価部位及びその有用性について検討した。なお、一連の統計解析には、フリーソフトウェアR3.4.2<sup>12)</sup>を用いた。

## 試験結果

### 1 花器構成部位別にみる花色評価値と開花数及び着果率との関係(試験1)

#### (1) 花領域に占める花器構成部位の面積比

2値化処理により抽出した花領域画像に占める花器構成部位別の面積比を図3に示した。ここでは、花冠向軸面の面積を100とする相対値で表した。供試した6画像の平均面積比は、花冠向軸面:花冠背軸面:葯筒=100:23:18で、花冠向軸面の面積が最も大きかった。

#### (2) 供試花房の花色評価値

抽出した花領域全体及び花器構成部位別の花色評価値( $\Delta a^*$ 、 $\Delta b^*$ 、 $\Delta C^*$ )を表1に示した。この表では、後述する着果率の降順に調査花房を配置した。花領域全体では、いずれ

の花色評価項目についても調査花房間に有意差が認められなかった。部位別の花色評価項目については、葯筒の $\Delta b^*$ を除いて調査花房間に有意差が認められた。

#### (3) 供試花房の開花数及び着果程度

調査した13花房の開花数、着果数及び着果率を表2に示した。この表では着果率を降順に配置した。開花数は最少5.4花～最多10.8花であったが、調査花房間に有意差が認められなかった。一方、着果数は最少0.6果～最多9.2果、着果率は最低7.7%～最高100.0%で、それぞれ調査花房間に有意差が認められた。

#### (4) 花色評価値と開花数及び着果程度との関係

花色評価値と当該花房の開花数、着果数及び着果率との相関係数を表3に示した。花領域全体の花色評価値は、開花数、着果数、着果率のいずれとも相関が認められなかった。花冠向軸面では、 $\Delta b^*$ と着果数及び着果率、 $\Delta C^*$ と着果数及び着果率との間に正の相関が認められた。花冠背軸面では、 $\Delta b^*$ と着果数及び着果率、 $\Delta C^*$ と着果率との間に正の相関が認められた。葯筒では、 $\Delta a^*$ と着果数及び着果率との間に正の相関が、 $\Delta b^*$ 及び $\Delta C^*$ と着果率との間に負の相関が認められた。花色評価値と着果数及び着果率との相関係数を評価部位別に比較したところ、花冠向軸面及び花冠背軸面と葯筒とで符合の正負が逆を示した。開花数については、いずれの部位の花色評価値とも相関が認められなかった。

### 2 花色評価値に基づく着果率予測モデル(試験2)

#### (1) モデルの選択

##### ア 多重共線性の検討

三つの説明変数間の相関係数及びVIF<sup>13)</sup>(Variance Inflation Factor)を表4に示した。 $\Delta b^*$ と $\Delta C^*$ の間で算出されたVIFは、葯筒を除いて10以上を示しており、多重共線性が疑われた。

##### イ 総当たり法による変数選択

評価部位別に検討したモデルA～Gについて、算出したAICを表5に示した。評価部位別にAICが最小であったモデルは、花領域全体のモデルD、花冠向軸面のモデルA、花冠背軸面のモデルD、葯筒のモデルAであった。ただし、前述のとおり花領域全体、花冠向軸面及び花冠背軸面では、説明変数 $\Delta b^*$ 及び $\Delta C^*$ 間に多重共線性が疑われたため、両変数を併用するモデルは検討から除外した。従って、その次にAICが小さいモデルは、花領域全体のモデルF、花冠向軸

表5 一般化線形モデルを用いたトマト花色評価に基づく着果率予測<sup>1)</sup>

評価部位	モデル符号	切片	説明変数別のパラメータ			AIC <sup>3)</sup>
			$\Delta a^*$	$\Delta b^*$	$\Delta C^*$	
花領域全体 <sup>2)</sup>	A	2.596	0.026	-0.329	0.289	339.7
	B	2.650	-0.091	-0.070	—	338.9
	C	2.425	-0.109	—	-0.070	339.6
	D	2.738	—	-0.297	0.251	337.8
	E	0.507	0.005	—	—	340.4
	F	1.465	—	-0.048	—	337.9
	G	1.086	—	—	-0.039	338.8
花冠向軸面	A	-4.090	0.838	-1.363	1.662	303.6
	B	-3.022	0.058	0.137	—	323.2
	C	-3.760	0.167	—	0.172	319.0
	D	-0.680	—	-0.181	0.297	320.5
	E	1.655	-0.157	—	—	335.4
	F	-2.275	—	0.122	—	321.6
	G	-1.718	—	—	0.125	319.6
花冠背軸面	A	2.294	0.073	-0.448	0.488	317.3
	B	2.057	-0.118	0.009	—	318.1
	C	1.882	-0.099	—	0.015	317.9
	D	2.593	—	-0.342	0.367	315.6
	E	2.442	-0.145	—	—	316.2
	F	0.410	—	0.044	—	317.9
	G	0.660	—	—	0.043	317.0
葯筒	A	-2.167	0.170	0.057	-0.082	283.9
	B	-2.788	0.208	0.007	—	286.8
	C	-1.711	0.163	—	-0.023	285.9
	D	1.168	—	0.050	-0.134	295.9
	E	-2.493	0.197	—	—	284.9
	F	1.743	—	-0.066	—	307.7
	G	1.472	—	—	-0.081	297.0

1) 品種「りんか409」、n=65

応答変数を花房当たり着果率、説明変数を花色評価値、確率分布を二項分布、リンク関数をロジット関数とした一般化線形モデルで解析した。

2) 画像処理で抽出した花の黄色部分(花冠向軸面、花冠背軸面、葯筒が混在)

3) 赤池情報量規準

面のモデルC、花冠背軸面のモデルEであった。結果的に選択された説明変数は、花領域全体で一つ( $\Delta b^*$ )、花冠向軸面で二つ( $\Delta a^*$ 、 $\Delta C^*$ )、花冠背軸面で一つ( $\Delta a^*$ )、葯筒で三つ( $\Delta a^*$ 、 $\Delta b^*$ 、 $\Delta C^*$ )であった。

## (2) モデルの評価

(1)で選択したモデルの精度を評価するため、評価部位別にモデルから出力した着果率(以下、予測値)と観察された着果率(以下、実測値)とを比較した。予測値と実測値との間で算出した相関係数及びRMSE(Root Mean Squared Error)を表6に示した。予測による誤差を示すRMSEが最も小さかった評価部位は葯筒で、次に花冠向軸面であった。相関係数が大きかった評価部位も、葯筒、花冠向軸面の順であった。予測結果の一例として、図4では葯筒を花色評価部位とする着果率予測モデルによる予測値及び実測値を散布図上に

プロットした。そのプロットは広範にばらつき、傾き1の破線から大きく乖離した。

## 考察

### 1 トマト花領域の抽出

背景が雑多な画像からトマト花領域を抽出する方法は、着果促進処理の自動化を目的とした研究でいくつかの報告事例がみられる<sup>14-16)</sup>。これらはHSV色空間を用い、H画像、S画像、V画像それぞれに閾値を設けて2値化処理を実行している。本研究でも、輝度、RGB色空間、HSV色空間、L\*a\*b\*色空間それぞれで2値化処理を試みた。その結果、L\*a\*b\*色空間のb\*画像では、単一の閾値で2値化処理が可能となり、最

表6 トマト花色評価に基づく着果率予測モデルの精度評価<sup>1)</sup>

評価部位	モデル符号	モデルの予測精度 <sup>3)</sup>	
		RMSE	r
花領域全体 <sup>2)</sup>	F	30.4	0.042
花冠向軸面	C	27.9	0.411
花冠背軸面	E	30.0	0.228
葯筒	A	25.9	0.481

1) 品種「りんか409」、n=65

応答変数を花房当たり着果率、説明変数を花色評価値、確率分布を二項分布、リンク関数をロジット関数とした一般化線形モデル

2) 抽出した花の黄色部分(花冠向軸面、花冠背軸面、葯筒が混在)

3) モデルから算出した着果率(予測値)と調査した着果率(実測値)との比較

RMSE:Root Mean Squared Error, r:相関係数

も簡便であることが分かった(データ略)。従って、本研究はこの方法を採用した。閾値の決定では、ソフトウェアに実装されているYen法<sup>17)</sup>を用いることで閾値調節の工程を半自動化でき、抽出作業が簡略化された。なお、この方法では、撮影時の光条件により花領域の周縁部がわずかに抽出できない画像もあったが、花色評価には支障をきたさないものと考えられた。ただし、花器構成部位別に抽出することは困難であったため、前述のとおり手動で行った。

## 2 トマト花色評価に基づく着果率予測モデル

試験1及び試験2では、前報<sup>7)</sup>の画像データ(n=30花房)に新たな画像データ(n=35花房)を追加し、これまで未検討であった花色評価に基づく着果率予測のモデル化に取り組んだ。花色評価と開花数、着果数、着果率との関係については、前報<sup>7)</sup>の結果と合致し、花冠向軸面の $\Delta b^*$ 及び $\Delta C^*$ は、いずれも着果数及び着果率と正の相関が認められた。ただし、花色評価には、曇雨天日に取得した画像データが望ましいものの、データ数を確保するために晴天日の遮光下で取得した画像データも併せて使用するとともに、新たな作付け期間(2019年の抑制栽培)のデータを多く追加してデータ量を2倍以上に増加させた結果、相関係数は前報<sup>7)</sup>に比べてやや低下した。新しい知見として、花冠背軸面の花色評価値は花冠向軸面のそれと同様な傾向にあったが、葯筒の花色評価値は花冠向軸面と正負逆の相関を示すことが明らかになった。つまり、着果率の高い花房では、花冠の黄色が濃く鮮やかな傾向にあるが、葯筒の黄色は薄くなるものと推察される。このように、花領域全体では、花色評価について特性の異なる部位が混在したため、花色評価値が相殺され、結果的にいずれの花色評価値も着果数及び着果率との間に相関が認められなかったものと推測される。また、供試した花領域全体の評価対象には、2値化処理の過程で顕著に萎凋又は退色した花は除かれたが、開花1~5日後の花が一括で含まれた。前報<sup>7)</sup>で花冠向軸面における花色評価値の経日変化を調査した結果、開花1~3日後は安定しているものの、同4日後頃から変化が生じることを確認している。これら開花4、5日後の花が含まれたことも、花領域全体の花色評価値と着果率との相関が認められなかった一因と考えられた。

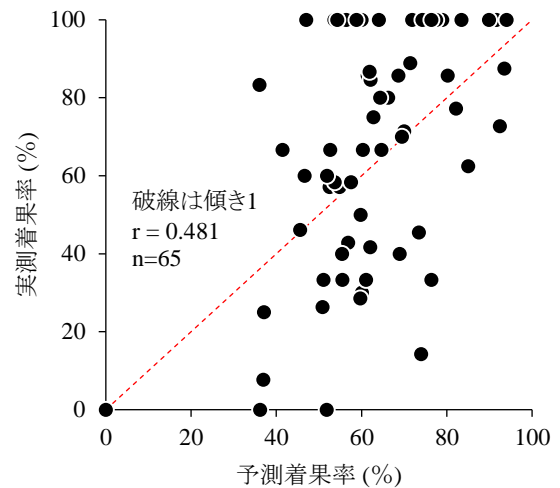


図4 葯筒を評価部位としたトマト花色評価に基づく着果率予測モデルの予測値と実測値

着果率予測のモデル化には一般化線形モデルを用いた。本研究では、応答変数である着果率を二項分布に従うものと仮定し、リンク関数をロジット関数とした。一般に、発芽率、生存率等の割合データには二項分布が適用され、そのモデル化にはロジスティックによる表現が適しているとされており<sup>8,9)</sup>、本研究もこれに準じた。なお、着果率が正規分布に従うと仮定した重回帰分析も実施したが、本報の結果を超えるモデルは得られなかった(データ略)。花器構成部位別に導出したモデルの予測精度は、高い順に葯筒、花冠向軸面、花冠背軸面、花領域全体であった。しかし、予測精度が最も高かった葯筒のモデルであっても、実測値と予測値との相関係数は0.481にとどまった。ただ、データセットの中に晴天日の画像データを含めたことも、これら予測精度を全体的に押し下げた要因と推測される。

## 3 トマト生育診断指標としての花色評価

花色と着果率との関係では、部位別に算出した相関係数の符合(正負)は一樣でなかった。従って、生育診断を目的とした花色評価では、花領域全体を一括で扱わず、部位を分けて評価する必要があるものと考えられる。しかし、花色評価値と着果率との関係はさほど強くなかった。一方、着果率予測に好適な花色評価部位は葯筒であったが、この部位を評価対象とし、複数の花色評価項目を組み合わせても花色のデータのみによる着果率予測は難しいことが示唆された。近未来の着果程度を予測する技術は、長期的な収量予測に発展し得るため有用であるが、先行研究は見当たらない。本研究では花色に着目したが、そのモデル化には花色以外の生育データ又は環境データも説明変数に組み込む必要がある。説明変数とした花色(花質)について、本研究は生産現場で導入しやすい可視画像による評価を検討してきたが、マルチスペクトルカメラ等を用いた分光画像からのアプローチは今後の課題である。

## 引用文献

1. 斎藤隆. 開花, 結実の生理, 生態. 農業技術大系野菜編第2巻. トマト. 農文協. 東京. p.基95-114(1984)
2. 青木宏史. 生育診断と草勢管理. 農業技術大系野菜編第2巻. トマト. 農文協. 東京. p.基391-402(1997)
3. 斎藤隆. 花芽発育と内的要因. 農業技術大系野菜編第2巻. トマト. 農文協. 東京. p.基80-93(2015)
4. 和田楓, 小番直樹, 貝塚隆史. トマト栽培温度の変化が生育と花色に及ぼす影響. 園学研. 19別1, 360(2020)
5. 元永佳孝. 果実の色計測とその応用. 計測と制御. 52, 718-723(2013)
6. 吉岡洋輔. センシング技術を活用した作物育種における表現型計測の高度化. 計測と制御. 52, 724-729(2013)
7. 樋江井清隆, 恒川靖弘, 小川理恵, 大川浩司. デジタル画像によるトマト花色の簡易評価と生育診断利用の可能性. 愛知農総試研報. 53, 105-114(2021)
8. アメリカ国立衛生研究所.  
<https://imagej.nih.gov/ij/download.html>(2018.3.9参照)
9. 篠田博之, 藤枝一郎. 色彩工学入門. 森北出版. 東京. p.73-124(2007)
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. 113-142(2012)
11. 今泉智通. Rを用いた一般化線形モデル(仮説検定編): 割合データを例に. 雑草研究. 55(4), 275-286(2010)
12. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. (2017). <https://www.R-project.org/>.
13. Shrestha, N. Detecting multicollinearity in regression analysis. American Journal of Applied Mathematics and Statistics. 8(2), 39-42(2020)
14. Ting, Y., Kondo, N. and Wei, L. Sunlight fluctuation compensation for tomato flower detection using web camera. Procedia Engineering. 29, 4343-4347(2012)
15. Oppenheim, D., Edan, Y. and Shani, G. Detecting tomato flowers in greenhouses using computer vision. WASET International Journal of Computer, Electrical, Automation, Control and Information Engineering. 11(1), 104-109(2017)
16. Rahim, U. F. and Mineno, H. Tomato flower detection and counting in greenhouses using faster region-based convolutional neural network. Journal of Image and Graphics. 8(4), 107-113(2020)
17. Yen, J. C., Chang, F. J. and Chang, S. A new criterion for automatic multilevel thresholding. IEEE Transactions on Image Processing. 4(3), 370-378(1995)