

スマートフォンを利用した画像解析によるトマト植物体の生育データ取得技術 の精度評価と葉幅測定の簡略化

樋江井清隆¹⁾・小川理恵²⁾・大川浩司²⁾

摘要:民間企業、農研機構及び愛知県農業総合試験場で共同開発した生育診断支援ツールを用い、スマートフォンのカメラで取得した画像に基づく測定(以下、画像測定)値を実測値と比較し、精度を評価した。測定対象は、トマトの茎径、茎頂部から最上位開花花房基部までの茎長(以下、開花位置)及び葉幅とした。画像測定では、測定用マーカーと測定部位を同一画面に写し込んで画像解析した。茎径及び開花位置はそれぞれ誤差率2.2%及び3.7%であった。一方、葉幅は葉の着生状態(葉先の巻き込み程度等)に影響を受け、品種によって誤差率3.7~6.6%であった。また、トマトの葉幅は葉軸の左右で概ね線対称であることを確認できたことから、葉幅測定の簡略化を図るために葉の片側のみを測定することで、葉幅を推定可能と考えられた。

キーワード:スマートフォン、トマト、葉幅、生育診断支援ツール、画像解析

Evaluation of the Accuracy of a Growth-Data Acquisition Method for Tomato Plants through Image Analysis using a Smartphone and Simplification of Leaf-Width Measurement Technique

HIEI Kiyotaka, OGAWA Rie, and OHKAWA Hiroshi

Abstract: In this study, we evaluated the accuracy of image measurement using a growth diagnosis support tool developed collectively with private enterprises, NARO, and Aichi Agricultural Research Center. The stem diameter, stem length from the shoot apex to the base of the highest flowering cluster (flowering position), and leaf width were measured in tomato plants using images acquired with a smartphone camera and compared with actual values; the accuracy of image measurement was evaluated using the growth diagnosis support tool. The image-measuring method involves capturing the measured parts and a marker for measurement on the same screen and performing image analysis on a smartphone. The error rate were 2.2% and 3.7% for stem diameter and flowering position, respectively. However, the error rate for leaf width varied between 3.7% and 6.6% depending on the variety, owing to variations in leafing conditions, such as the degree of leaf-tip curl. Moreover, the axial symmetry of leaf width was confirmed in tomato plants, indicating that measuring one side enables the estimation of leaf width, and simplifies the measurement procedure.

Key Words: Smartphone, Tomato, Leaf width, Growth diagnosis support tool, Image analysis

本研究の一部は園芸学会令和3年度秋季大会(2021年9月)において発表した。また、本研究は経済産業省「商業・サービス競争力強化連携支援事業(新連携支援事業)」(2019~2021年度)により実施した。

¹⁾園芸研究部(現愛知県立農業大学校) ²⁾園芸研究部

(2023.9.8受理)

緒言

先進的なトマト産地では、定期的な生育調査が生産者等により実施されるものの、調査方法が煩雑な手作業であること、調査データを効果的に活用できていないこと等の課題が散見される。そこで愛知県農業総合試験場(以下、愛知農総試)は、民間企業及び国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構(以下、農研機構)と共同でスマートフォンのカメラ・通信・情報処理機能を利用し、画像による生育データ取得、環境データとの照合及び生育履歴の可視化等を手軽に行える生育診断支援ツール「生育ナビ®」(スマートフォン用アプリケーションソフト、株式会社ITAGEの登録商標(以下、ツール))を開発した¹⁾。現時点において、同様なツールは他に見当たらない。本稿では、トマトの生育診断の指標とされる茎径及び茎頂部から最上位開花房基部までの茎長(以下、開花位置)^{2,3)}、更には個葉面積を推定するための葉幅⁴⁾について、ツールによる測定の精度を評価した。併せて、ツール利用を想定した葉幅測定の簡略化技術についても検討したので報告する。

材料及び方法

1 スマートフォンを利用した測定

(1) 供試資機材

スマートフォンを利用した測定(以下、画像測定)では、表1に示したスマートフォン、アプリケーションソフト「生育ナビ®」(株式会社ITAGE、名古屋)及び専用の測定用マーカ(以下、マーカ)を用いた。マーカは同ソフトの附属品で、長

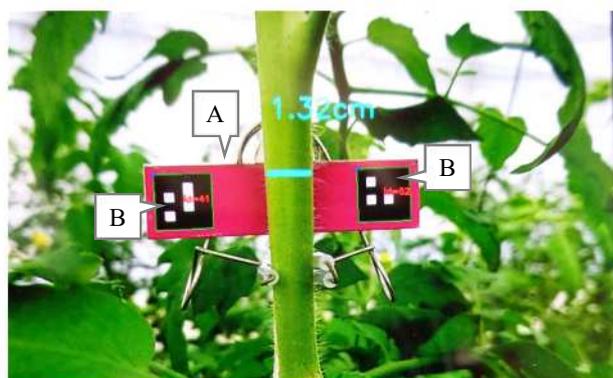


図1 茎径の画像測定方法

A: 茎径測定用マーカ(両端部にArUcoを各1個配置)
B: ARマーカ「ArUco」

さ75 mm×幅20 mm×厚さ約3 mmのプラスチック板の両面に15 mm四方のAR(拡張現実)マーカ「ArUco^{5,6)}」がそれぞれ1又は2個印字されている(図1)。なお、供試したマーカはプロトタイプで、クリップ付きであった。なお、試験は2020年5月及び2022年2月に行った。

(2) 測定方法

「生育ナビ®」の測定画面上で測定対象及びマーカを同一画面に写し込み、自動又は半自動で画像解析することにより茎径、開花位置及び葉幅の測定値を取得した。測定時には、撮影者がスマートフォン及びマーカを手で保持し、撮影距離を30~40 cmとした。測定部位別の撮影の様子を図1~3に示した。ただし、ここでは測定部位の説明用にマーカをクリップで固定して撮影している。いずれの撮影条件も自然光下とし、被写体の背景には単色のスクリーン等を設置しなかった。

ア 茎径

茎径測定用には、マーカの両端部にArUcoが各1個配置された面を使用した(図1)。茎とマーカとが接するように、かつ茎の背後にマーカを設置して撮影し、2個のArUcoの間に位置する茎の直径を測定した。測定対象の茎と背景との境界線は自動で検出(エッジ検出)された。生育診断では、



図2 開花位置の画像測定方法

C: 開花位置及び葉幅測定用マーカ
(中央部にArUcoを1個配置)
D: 直線による測定部位への当てはめ
E: 茎頂部の位置は手動(画面タッチ)で指定した

表1 供試機器及び供試ソフトウェアの仕様

試験年次	スマートフォン			生育診断支援ツール ¹⁾
	メーカー	機種	OS	Version 情報
2020年	サムスン電子(株)	Galaxy S10 Plus	Android10	α版
2022年	富士通(株)	Arrows5G F-51A	Android12	0.2.9(27)

1) スマートフォン用アプリケーションソフト「生育ナビ®」((株)ITAGE)

本来、茎頂部から15 cm下の茎径(短径)を測定する。しかし、本試験では測定精度を検討するため、上記の測定位置に加えて果実肥大～収穫期にある果房周辺の茎でも測定し、広範なデータを収集した。

イ 開花位置

開花位置(茎頂部から最上位開花花房基部までの茎長)測定用には、マーカの中央部にArUcoが1個配置された



図3 開花位置の画像測定方法
この図では測定葉を識別しやすいように葉縁部を白線で示した
C:開花位置及び葉幅測定用マーカ
(中央部にArUcoを1個配置)
D:折れ線による測定部位への当てはめ



図4 片側葉幅の比較部位

面を使用した(図2)。開花花房の基部(茎の手前)に1個のArUcoが位置するようにマーカを設置して撮影し、そのArUcoから茎頂部までの茎長を直線又は折れ線で近似した。茎頂部の検出は、液晶画面上において手動(画面タッチ)で行った。2020年の試験時には直線で、2022年の試験時には折れ線で近似した。折れ線の屈折点の数及び位置は任意で設定できるため、茎の曲がり程度に応じて0~2か所を設定して測定した。スマートフォンは開花花房と茎頂部のほぼ中間の高さで保持し、撮影角度を水平とした。

ウ 葉幅

開花位置と同様に、葉幅測定用にはマーカの中央部にArUcoが1個配置された面を使用した(図3)。最も長い側小葉の基部(葉軸の手前)に1個のArUcoが位置するようにマーカを設置して撮影し、そのArUcoから当該側小葉の先端までの長さ(以下、片側葉幅)を折れ線で近似した。そして、この測定値を2倍して葉幅とした。葉先の検出及び折れ線の当てはめは、開花位置の測定方法に準じた。なお、葉幅測定では、折れ線の屈折点を任意の位置に設定できるが、2020年の試験時には屈折点を2か所のみとする設定であった。しかし、2022年の試験時には屈折点を任意数で設定できるようになり、葉の曲がり程度に応じて4~6か所を設定して測定した。

表2 測定方法の比較に用いた実測値のデータセット¹⁾

測定項目	品種	n ⁵⁾	最小	最大	平均
茎 径	3 品種混合 ³⁾	30	6.8	19.0	11.7
開花位置 ²⁾	3 品種混合 ³⁾	30	10.5	31.0	19.5
葉 幅	桃太郎ヨーク	15	35.5	62.5	51.2
	りんか409	15	38.5	57.0	49.6
	S.ファースト ⁴⁾	15	37.5	70.5	53.3

- 1) 2020年5月取得、使用単位 茎径:mm、開花位置:cm、葉幅:cm
- 2) 茎頂部から最上位開花花房基部までの茎長
- 3) 「桃太郎ヨーク」、「りんか409」及び「スーパーファースト」を一括で扱った
- 4) スーパーファースト
- 5) 標本サイズ

表3 トマト植物体を対象とした画像測定値と実測値との比較 (2020年試験)¹⁾

測定方法	茎径 (mm)		開花位置 ²⁾ (cm)		葉幅 ³⁾ (cm)					
	3 品種混合 ⁴⁾		3 品種混合 ⁴⁾		桃太郎ヨーク		りんか409		スーパーファースト	
	平均	SD ⁵⁾	平均	SD	平均	SD	平均	SD	平均	SD
画像計測	12.9	3.2	19.3	5.4	62.1	12.2	64.1	5.7	60.3	10.9
実 測	11.7	2.9	19.5	5.5	51.7	7.6	49.6	9.2	53.3	9.7
MAPE(%) ⁶⁾	10.4	—	4.9	—	20.2	—	29.2	—	13.3	—
相関係数	0.98	—	0.98	—	0.90	—	0.78	—	0.95	—

- 1) 標本サイズ 茎径及び開花位置 n=30 (3品種混合)、葉幅 1品種当たり n=15
- 2) 茎頂部から開花花房基部までの茎長
- 3) 片側葉幅を2倍して取得した
- 4) 「桃太郎ヨーク」、「りんか409」及び「スーパーファースト」を一括で扱った
- 5) 標準偏差
- 6) Mean Absolute Percentage Error (%) = $100/n \sum |(\text{画像測定値} - \text{実測値}) / \text{実測値}|$

2 実測

実測では、茎径はデジタルノギス(CD-S15C、株式会社ミツヨ、神奈川県)、開花位置及び葉幅はメジャー(KB15、原度器株式会社、神奈川県)を用いて、画像測定時と同一部位

表4 測定方法の比較に用いた実測値のデータセット¹⁾

測定項目	品種	n ⁴⁾	最小	最大	平均
茎 径	2 品種混合 ³⁾	30	7.9	14.3	11.2
開花位置 ²⁾	2 品種混合 ³⁾	30	8.5	28.2	18.1
葉 幅	桃太郎ヨーク	15	40.0	55.0	46.7
	麗 妃	15	36.0	56.0	47.3

- 1) 2022年2月取得、使用単位 茎径:mm、開花位置:cm、葉幅:cm
- 2) 茎頂部から最上位開花花房基部までの茎長
- 3) 「桃太郎ヨーク」及び「麗妃」を一括で扱った
- 4) 標本サイズ

(茎及び葉)を立毛状態で測定した。葉幅については、画像測定と同様に片側葉幅を測定し、これを2倍して求めた。

また、片側葉幅を2倍して葉幅を算出する測定方法の妥当性を検証するため、葉幅の対称性について調査した。図4に示したように、葉の向軸面を上面に葉柄基部を手前に配置して左側をL、右側をRとし、葉軸の左右で片側葉幅を比較した。この調査は、葉を株から切り離し、机上に広げてメジャーで測定した。

3 調査規模及び調査日

(1) 画像測定と実測との比較(2020年試験)

茎径及び開花位置の標本サイズは30(3品種混合)とし、葉幅のそれは品種別に1品種当たり15(計3品種)とした。葉幅測定では、葉幅10 cm以上の最も若い葉から数えて展開第5~7葉を対象とし、かつ奇形・損傷のない葉を選定した。調査は2020年5月12~22日に実施した。評価の普遍性を高める

表5 トマト植物体を対象とした画像測定値と実測値との比較 (2022年試験)¹⁾

測定方法	茎径(mm)		開花位置 ²⁾ (cm)		葉幅 ³⁾ (cm)			
	2 品種混合 ⁴⁾		2 品種混合 ⁴⁾		桃太郎ヨーク		麗妃	
	平均	SD ⁵⁾	平均	SD	平均	SD	平均	SD
画像測定	11.1	1.6	18.0	4.7	46.1	5.3	45.4	4.8
実 測	11.2	1.7	18.1	4.6	46.7	4.1	47.3	4.9
MAPE(% ⁶⁾	2.2	—	3.7	—	3.7	—	6.6	—
相関係数	0.99	—	0.98	—	0.96	—	0.70	—

- 1) 標本サイズ 1品種当たり n=15
- 2) 茎頂部から開花花房基部までの茎長
- 3) 片側葉幅を2倍して取得した
- 4) 「桃太郎ヨーク」及び「麗妃」を一括で扱った
- 5) 標準偏差
- 6) Mean Absolute Percentage Error (%) = 100/n Σ |(画像測定値 - 実測値) / 実測値|

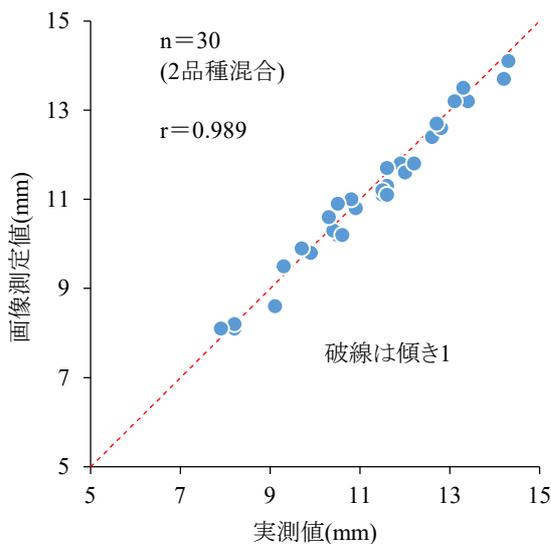


図5 トマト茎径の画像測定値と実測値との比較
品種は「桃太郎ヨーク」及び「麗妃」
実測値はノギスで測定した

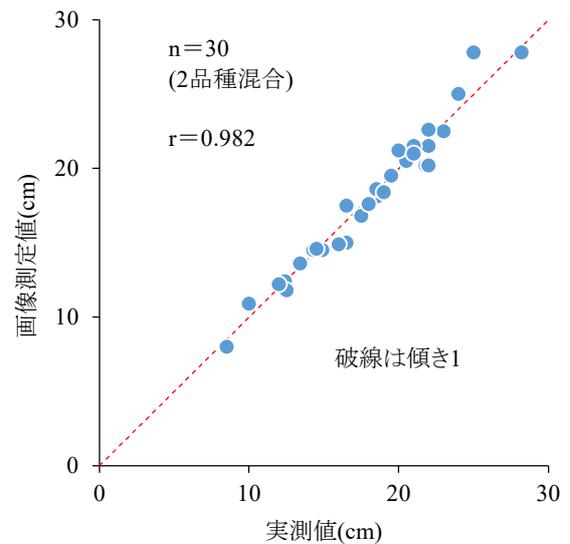


図6 トマト開花位置の画像測定値と実測値との比較
品種は「桃太郎ヨーク」及び「麗妃」
実測値はメジャーで測定した

ため、できるだけ広範な測定値で比較するように供試株及び供試部位をハウス内全体から選定した。

(2) 画像測定と実測との比較(2022年試験)

茎径及び開花位置の標本サイズは30(2品種混合)とし、葉幅のそれは品種別に1品種当たり15(計2品種)とした。調査は2022年2月1日及び2月2日に実施した。供試株及び供試部位の選定は(1)に準じた。

(3) 葉幅の対称性調査

標本サイズは1品種当たり15とした。完全に展開した上位葉～下位葉を対象とし、かつ奇形・損傷のない45葉(=15葉×3品種)を選定した。調査は2020年5月13日及び5月15日に実施した。

4 試験場所及び供試トマトの栽培条件

試験場所は、いずれも愛知農総試内の高軒高ハウス(266m²)とした。

(1) 画像測定と実測との比較(2020年試験)

供試品種は「桃太郎ヨーク」(タキイ種苗株式会社、京都)、「りんか409」(株式会社サカタのタネ、神奈川)及び「スーパー

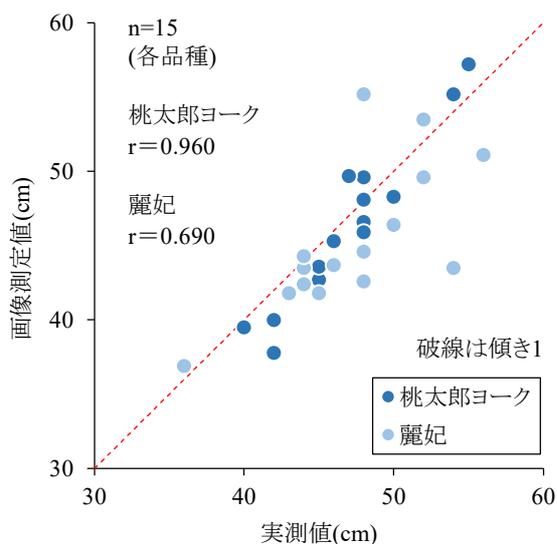


図7 トマト葉幅の画像測定値と実測値との比較
品種は「桃太郎ヨーク」及び「麗妃」
実測値はメジャーで測定した

ファースト」(愛三種苗株式会社、愛知)とし、いずれも自根で用いた。作型は半促成栽培とし、播種2019年12月8日(72穴セル成型トレイ)、鉢上げ12月29日(3.5号鉢)、定植2020年2月3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20 cm×畝幅180 cmで1株ごと交互に振り分けて誘引した。着果安定のため、花房には4-CPA液剤(トマトーン、石原産業株式会社、大阪)を100倍に希釈して噴霧するとともに、果房当たり最多で4果に摘果した。施肥は園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⁻¹を施用した。この液肥には、微量要素液肥(OATハウス5号、OATアグリオ株式会社、東京)を4万倍になるように希釈混合して添加した。ハウス内の温度は、日中の換気開始を27℃設定、冬季の温風暖房開始を12℃設定で管理した。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。

(2) 画像測定と実測との比較(2022年試験)

供試品種は「桃太郎ヨーク」(タキイ種苗株式会社、京都)及び「麗妃」(株式会社サカタのタネ、神奈川)とし、いずれも台木「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。作型は促成長期栽培とし、播種2021年7月5日(72穴セル成型トレイ)、接ぎ木7月21日、定植8月10日とした。12月21日から翌年3月31日まで燃焼式発生装置(CG-254S2、ネポン株式会社、東京)を用いて、二酸化炭素を施用した。二酸化炭素の濃度は、密閉時500 μmol mol⁻¹、換気時400 μmol mol⁻¹を目標に管理した。このほか、栽培方式、栽植様式及び栽培管理方法等は(1)と同様とした。

(3) 葉幅の対称性調査

(1)のとおりであった。

試験結果

表6 トマト片側葉幅の左右比較に用いたデータセット¹⁾

品 種	n ²⁾	最小	最大	平均
桃太郎ヨーク	15	30.5	62.5	51.2
りんか409	15	40.5	65.5	54.7
スーパーファースト	15	38.0	72.0	53.4

1) 使用単位 cm

2) 標本サイズ

表7 トマト片側葉幅の左右比較¹⁾

測定部位 ²⁾	桃太郎ヨーク		りんか409		スーパーファースト	
	平均値	SD ³⁾	平均値	SD	平均値	SD
L	25.7	4.4	27.6	3.7	26.5	5.0
R	25.4	4.0	27.1	3.9	26.9	4.9
有意性 ⁴⁾	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

1) 使用単位 cm、標本サイズ 1品種当たり n=15

2) 葉の向軸面を上面に、葉柄基部を手前に配置したとき
L:葉軸左側の片側葉幅、R:葉軸右側の片側葉幅

3) 標準偏差

4) 平均値は対応のあるt検定、SDはF検定 n.s.:有意差なし

1 画像測定と実測との比較(2020年試験)

(1) 供試したデータセットの特性

各測定には3品種を供試したが、茎の形状に品種間差異は観察されなかった(データ略)ため、茎径及び開花位置の測定データは3品種を一括で扱った。一方、葉の着生状態には、品種間差異が観察されたため、葉幅の測定データは品種別に扱った。葉柄の下垂・小葉の湾曲・葉先の巻き込みの程度は、「りんか409」、「桃太郎ヨーク」、「スーパーファースト」の順に大きかった。評価に用いた実測値データセットの基本統計量を表2に示した。

(2) 茎径

画像測定値は平均12.9 mm(標準偏差3.2 mm、以下SD)、実測値は平均11.7 mm(SD2.9 mm)であった(表3)。確度を表す平均絶対誤差率(Mean Absolute Percentage Error、以下MAPE)は10.4%、精度を表す相関係数は0.98であった。

(3) 開花位置

画像測定値は平均19.3 cm(SD5.4 cm)、実測値は平均19.5 cm(SD5.5 cm)であった(表3)。MAPEは4.9%、相関係数は0.98と、確度は茎径を上回り、精度は茎径と同程度であった。

(4) 葉幅

葉の湾曲程度が最も小さかった「スーパーファースト」の画像測定値は平均60.3 cm(SD10.9 cm)、実測値は平均53.3 cm(SD9.7 cm)で、MAPEは13.3%、相関係数は0.95であった。湾曲程度が最も大きかった「りんか409」の画像測定値は平均64.1 cm(SD5.7 cm)、実測値は平均49.6 cm(SD9.2 cm)で、MAPEは29.2%、相関係数は0.78であった(表3)。葉幅の画像測定では、確度・精度に品種間差異がみられ、「りんか409」では、「スーパーファースト」に比べて確度・精度ともに低かった。葉の湾曲程度が前2品種の中間に当たる「桃太郎ヨーク」については、精度・確度ともに中程度であった。

2 画像測定と実測との比較(2022年試験)

(1) 供試したデータセットの特性

茎径及び開花位置の測定データは2品種を一括で扱い、葉幅の測定データは品種別に扱った。「麗妃」の葉は、「桃太郎ヨーク」のそれに比べて、葉柄の下垂・小葉の湾曲・葉先の巻き込みの程度がそれぞれ大きかった。評価に用いた実測値データセットの基本統計量を表4に示した。

(2) 茎径

画像測定値は平均11.1 mm(SD1.6 mm)、実測値は平均11.2 mm(SD1.7 mm)であった(表5)。MAPEは2.2%、相関係数は0.99であった。画像測定値及び実測値を散布図にプロットしたところ、傾き1の直線近辺に分布した(図5)。

(3) 開花位置

画像測定値は平均18.0 cm(SD4.7 cm)、実測値は平均18.1 cm(SD4.6 cm)であった(表5)。MAPEは3.7%、相関係数は0.98で、茎径と同程度の確度・精度を示した。画像測定値及び実測値の散布図は、茎径と同様に傾き1の直線近辺に分布した(図6)。

(4) 葉幅

「桃太郎ヨーク」の画像測定値は平均46.1 cm(SD5.3 cm)、実測値は平均46.7 cm(SD4.1 cm)で、MAPEは3.7%、相関係数は0.96であった(表5)。一方、「麗妃」の画像測定値は平均45.4 cm(SD4.8 cm)、実測値は平均47.3 cm(SD4.9 cm)で、MAPEは6.6%、相関係数は0.70であった。葉幅の画像測定では、確度・精度に品種間差異がみられ、「麗妃」のデータは、「桃太郎ヨーク」のそれに比べて、確度・精度ともに低かった。葉幅における画像測定値及び実測値の散布図は、茎径及び開花位置のそれに比べてばらつきが顕著であった(図7)。

3 葉幅の対称性調査

(1) 供試したデータセットの特性

供試した葉幅データセットの基本統計量を表6に示した。「桃太郎ヨーク」は最小30.5～最大62.5 cmで平均51.2 cm、「りんか409」は最小40.5～最大65.5 cmで平均54.7 cm、「ス

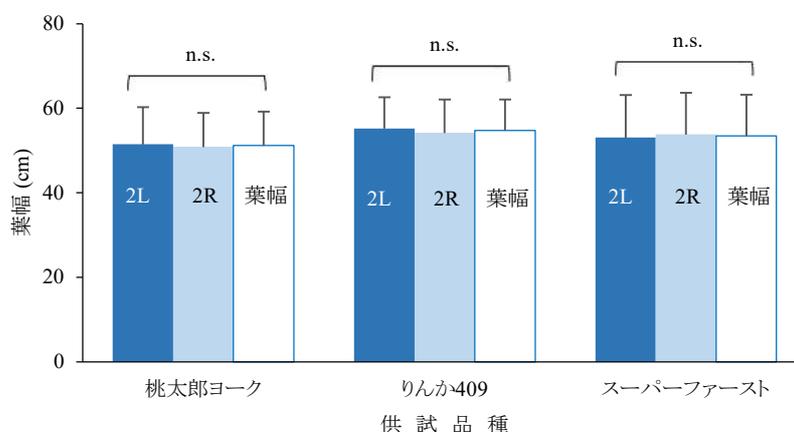


図8 トマト片側葉幅の2倍値と葉幅実測値との比較

エラーバーは標準偏差(n=15)

葉の向軸面を上面に、葉柄基部を手前に配置したとき

2L:葉軸左側の片側葉幅2倍値、2R:葉軸右側の片側葉幅2倍値、葉幅:全幅の実測値

n.s.:一元配置分散分析により有意差なし

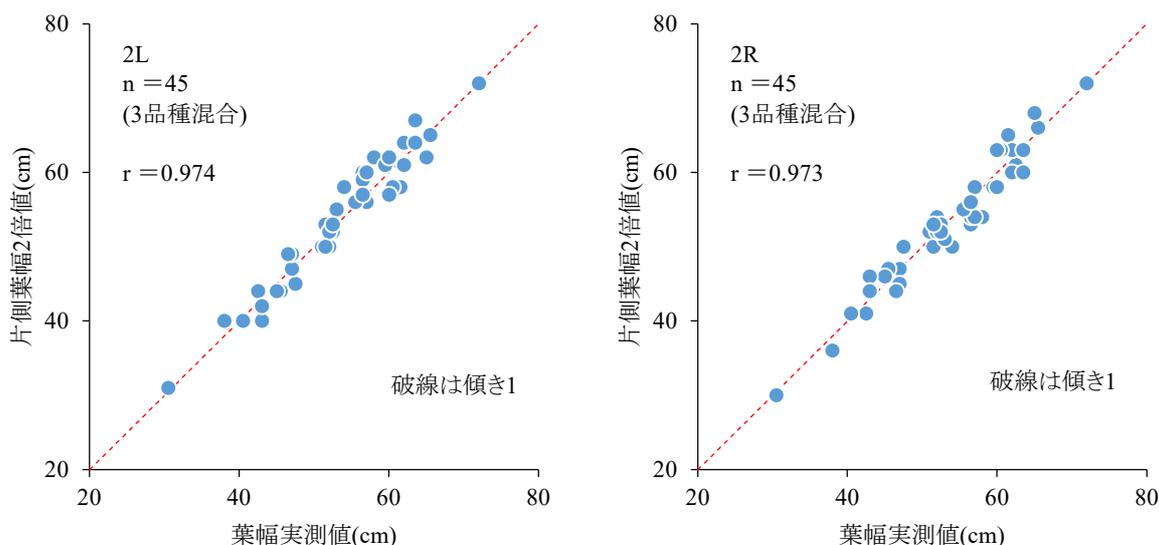


図9 トマト片側葉幅の2倍値と葉幅実測値との関係

品種:「桃太郎ヨーク」、「りんか409」及び「スーパーファースト」

葉の向軸面を上面に、葉柄基部を手前に配置したとき

2L: 葉軸左側の片側葉幅2倍値、2R: 葉軸右側の片側葉幅2倍値、葉幅: 全幅

「スーパーファースト」は最小38.5～最大72.0 cmで平均53.4 cmであった。

(2) 片側葉幅の2倍値と葉幅実測値との比較

片側葉幅について、その左右で比較した結果を表7に示した。いずれの品種も、葉軸の左右で片側葉幅の平均値及びばらつきに有意差は認められなかった。次に、左右の片側葉幅2倍値及び葉幅実測値(全幅の実測値)を図8に示した。いずれの品種も、左右それぞれの片側葉幅2倍値及び葉幅実測値の間に有意差は認められなかった。そこで、3品種分のデータをまとめて葉幅の全幅実測値と左右の片側葉幅2倍値との関係を散布図に示した(図9)。左右いずれも傾き1の直線近辺に分布し、相関係数は0.974及び0.973と同程度であった。

考察

1 ツールを用いた画像測定方法と確度・精度

ツールによる画像測定では、撮影画面を投影面として被写体投影像の大きさを測定する。従って、測定誤差を小さくするには、測定部位の投影像ができるだけ最大値に近づくように撮影角度を調整する必要がある。林田ら⁷⁾はArUcoを用いて小ギクの直上から蕾径の画像測定を試み、マーカーの上下方向(=撮影距離)のずれ又はマーカーの傾斜角により誤差が発生しやすいことを指摘している。本稿では、予備試験により見出した測定に好適な撮影距離30～40 cmで試験を実施した。撮影方向に対するマーカー面の角度は直角を最適とするが、本研究のツールには、マーカー面が少々傾いてもArUcoの歪み程度を検出し、自動的に撮影角度を考慮して補正する機能が実装されている。特に茎径の測定ではArUcoを2個用いており、開花位置及び葉幅の測定に

比べて、誤差が生じにくい頑強な方式を採用している。なお、本ツールでは、使用するArUcoの数にかかわらず、いずれの測定もArUcoの1辺15 mmを直径又は長さの基準としている。

2022年の試験では、茎径、開花位置及び葉幅いずれの測定項目においても、開発初期段階に当たる2020年の試験に比べて確度・精度が明らかに向上した。これらの結果は、前述した測定用マーカーの歪み検出機能や折れ線近似における屈折点数の任意設定機能が追加されたこと等のツール改良によるものと考えられる。

2022年の試験において、ツールによる茎径及び開花位置の画像測定はMAPE2.2～3.7%程度に収まった。このように、直線及び直線に近い形状については、高い精度で測定が可能であることが明らかになった。一方、葉幅の画像測定は、品種によって確度・精度が異なり、品種によってはMAPE6.6%と、茎径及び開花位置の画像測定に比べてやや大きい誤差率であった。これらは、葉の着生状態に起因したものと考えられる。ツールは、曲線部分を折れ線で近似するため、曲がり程度によって誤差が大きくなりやすかった。本稿では、葉幅の測定対象を開花花房～果実肥大初期の果房に近い第5～7葉とした。一方、収穫中の果房に近い下位葉では、供試4品種いずれも葉柄の下垂、小葉の湾曲、葉先の巻き込みの程度が大きく、同一株及び隣接株の中・下位葉と相互に重なりがみられる。加えて、下葉かき作業、収穫作業、葉先枯れ等による損傷が散見されるため、下位葉は葉幅の画像測定に不適と考えられた。葉幅測定については、折れ線に代わって曲線の当てはめ、茎頂部又は葉先の自動検出等、更なる確度・精度及び操作性の向上に向けて技術改良の余地がある。ただし、画像処理の高度化は、同時にツールの動作速度を低下させる。このため、生育調査にかける時間・労力、生育診断による増収効果等を考慮した

改良水準を検討するとともに、スマートフォンの処理速度向上やハウス内の通信環境高速化に応じて技術改良を進める必要がある。

2 葉幅測定の簡略化

トマトの葉幅は、葉軸の左右で概ね線対称であることが確認された。従って、片側葉幅を測定し、これを2倍することで葉幅を推定可能と考えられ、この結果はツールにおける葉幅測定方法の妥当性を支持した。群落内にある植物体の葉幅調査は煩雑な作業であるため、片側葉幅の測定のみで済ませられれば調査労力及び所要時間を縮減できる。ツールによる葉幅測定の目的は、個葉面積の推定、更には葉面積指数の算出であり、葉幅から個葉面積を推定する⁴⁾機能は既に実装されている。葉面積指数の簡易推定に有効かつ省力的な葉幅調査方法については、ツールへの実装を見据えて検討を進めているところである。

3 生育診断支援ツールの実用化に向けて

茎径及び開花位置を用いたトマトの生育診断は、草勢の強弱及び栄養成長・生殖成長の生育相バランスを把握でき、その後の栽培管理の改善に有用であることが知られている^{2,3)}。施設園芸先進国のオランダでは、多くのトマト生産者が週1回の生育調査を実践し、これらデータをもとに栽培コンサルタントと協議しながら具体的な栽培戦略を決定している⁸⁾。しかし、取得した各種データを判断材料として栽培管理にフィードバックするには、継続的な生育調査・分析はもとより経験に基づく高い見識を必要とする。このため、生産者が栽培管理・経営管理に日々追われながら、単独で生育調査に基づく生育診断を継続的に実施することは容易でない。ましてや、国内において栽培コンサルタントとの契約はまだ一般的でない。一方で、普及が進む高軒高ハウスを利用した促成長期栽培は、作付け期間が10～11か月と長期に及び、期間を通して高収量・高品質を安定的に確保するには、的確な栽培管理による草勢コントロールが要求される。そこで本研究は、スマートフォン1台及びマーカー1枚を携帯するのみで、生育調査からデータの集計・管理、診断までを圃場に居ながら完結できるように、ツール利用による生育診断の簡便化・客観化・可視化を目指している。生産者が普及指導員、営農指導員及び産地内外の生産者等と生育の良否や栽培技術を議論する場面では、スマートフォンを介して情報共有可能な生育データは共通言語として機能し得るものと考えら

れる。

謝辞: 本研究で供試した生育診断支援ツール「生育ナビ[®]」の共同開発に当たり、画像解析、プログラミング、UIデザイン等を担って頂いた株式会社ITAGEの横井健治氏、大下真弘氏及び廣瀬方希氏ほか関係諸氏、環境モニタリング機器とのデータ連携に御尽力を頂いた株式会社IT工房Zの座光寺勇氏、プロジェクト全般にわたって終始的確な御助言を頂いた農研機構の土生芳樹博士に厚く感謝の意を表する。

引用文献

1. 株式会社ITAGE. ITAGEアグリソリューションサイト生育ナビ. https://agri-solution.itage.jp/growth_navi.(2023.6.26参照)
2. 吉田征司, 加島洋亨. 太陽光型植物工場の事例, (1) トマト. 施設園芸・植物工場ハンドブック.(日本施設園芸協会編). 農文協. 東京. p.314-318(2015)
3. 柴智徳, 今村俊規, 知識秀裕. トマトのロックウール栽培におけるデータに基づいた植物体管理. 農業技術大系野菜編第12巻. 共通技術・先端技術. 農文協. 東京. p.基151-164(2015)
4. 樋江井清隆, 伊藤緑, 番喜宏, 恒川靖弘. 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. 愛知農総試研報. 50, 19-26(2018)
5. OpenCV 4.6.0. Detection of ArUco Markers, https://docs.opencv.org/4.6.0/d5/dae/tutorial_aruco_detection.html(2022.6.19参照)
6. Garrido-Jurado, S., Muñoz-Salinas, R., Madrid-Cuevas, F. J., and Marín-Jiménez, M. J. Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion. *Pattern Recognition*. 47, 2280-2292(2014)
7. 林田平馬, 印田清秀, 増山史倫. ARマーカーを利用した小ギク蕾径測定と集計方法の効率化についての検討. 情報処理学会第83回全国大会講演論文集(1), 345-346(2021)
8. 斎藤章. オランダに学んだ環境制御の取り入れ方. 農業技術大系野菜編第2巻. トマト. 農文協. 東京. p.基560の32-560の53(2014)