

葉幅測定によるトマト葉面積指数推定技術の開発

樋江井清隆¹⁾・延命直紀²⁾・伊藤 緑¹⁾・犬飼瑠伽³⁾・田中哲司²⁾・大川浩司²⁾

摘要: トマト葉面積指数(以下LAI)の簡便な推定技術を開発するため、有効な計算手順及び好適な調査葉位について3品種で検討した。その結果、株当たり平均葉幅を算出してから葉面積に変換する計算手順を踏み、これを平均個葉面積とみなすこと、調査対象を全ての花房及び果房の直下葉とすることにより、安定的に高いLAI推定精度を確保できると考えられた。これらの結果をもとに、算出した株当たり平均個葉面積に株当たり着生葉数及び栽植密度を乗じることで、LAIを推定できた。その平均絶対誤差率は4.6~8.3%であった。また、葉幅の経日変化を調査した結果、新葉展開後、茎頂部から数えて第6~7葉期に達すると伸展が停止することを明らかにした。この葉位は群落内でも葉が混み合わず、葉幅測定作業で葉を損傷しにくいことから、最適な調査時期と考えられた。

キーワード: 葉幅、トマト、葉面積指数、計算手順、葉位

Development of a Method for Tomato Leaf Area Index Estimation using Leaf Width

HIEI Kiyotaka, EMMEI Naoki, ITO Midori, INUKAI Ruka, TANAKA Tetsushi,
and OHKAWA Hiroshi

Abstract: To develop an easy method for determining the tomato leaf area index (LAI), we investigated an effective calculation procedure and optimal leaf position for measurements across three cultivars. The procedure involved converting the average leaf width per plant into leaf area, treating this as the mean individual leaf area per plant, and selecting leaves just below all flowering- and fruit-clusters for measurement. This method provided a consistent and highly accurate LAI estimation. The LAI could then be calculated by multiplying the mean individual leaf area, the total number of leaves on the plant, and the planting density. The mean absolute percentage error ranged between 4.6% and 8.3%. Daily changes in leaf width were also examined. Once a young leaf reached the sixth or seventh position from the shoot apex, its width extension stopped. Leaves in this position were not crowded within the plant canopy, making it possible to measure leaf width in situ without causing leaf damage. Therefore, this leaf position was deemed optimal for the measurement.

Key Words: Leaf width, Tomato, Leaf area index, Calculation procedure, Leaf position

本研究の一部は園芸学会令和5年度春季大会(2023年3月)においてポスター発表した。また、本研究の一部は農林水産省「戦略的スマート農業技術等の開発・改良」事業により実施した。

¹⁾園芸研究部(現豊田加茂農林水産事務所) ²⁾園芸研究部 ³⁾園芸研究部(現知多農林水産事務所)

(2024.9.4受理)

緒言

トマト栽培において、葉面積指数(以下LAI)は生育診断及び収量予測等に利用されることが多く、その重要性は生産及び研究の現場で広く理解されている^{1,4)}。しかし、トマトに着生する葉の形態は複雑な羽状複葉を呈し、葉面積計又はスキャナを用いても個葉面積の測定は容易でなく、非破壊による直接的な測定は現実的でない⁵⁾。一方、光学的にLAIを推定する手段もあるが、専用機器を必要とする^{6,7)}。また、近年では、Kinect[®](深度センサの一種、Microsoft社の商標)、ステレオカメラ、衛星搭載SAR(合成開口レーダ)等を用いて画像解析によるLAI推定の試みが散見されるものの、葉が幾層にも重なり合うトマト群落への適用は困難とされる⁸⁻¹³⁾。

こうした中、本研究は民間企業等と共同開発した生育診断支援ツール(登録商標「生育ナビ[®]」¹⁴⁾、株式会社ITAGE、名古屋)の利用を想定し、葉幅から個葉面積を推定する手法⁹⁾をもとに生産現場でLAIを簡便に推定する技術の確立を目指す。本稿では、株当たり平均個葉面積を算出するために有効な計算手順及び抽出調査部位(以下、調査葉位)について検討した。また、葉幅データ取得に適切な調査時期を見出すため、葉の展開後に葉幅の伸張が停止する葉位を明らかにした。これらの結果から、LAI推定技術を開発できたので報告する。

材料及び方法

試験1 LAI推定に有効な計算手順及び好適な調査葉位の検討

(1) 試験場所、試験規模及び試験区画

試験場所は愛知県農業総合試験場内の高軒高ハウス(266 m²、軒高3.5 m)とした。試験規模は1品種当たり1畝(隔離床、長さ12.2 m×幅55 cm)とし、同一畝には同一トマト品種を1畝当たり60株栽植した。それぞれの畝内には、図1に示したとおり、隣接する10株で構成される三つの区画(A、B及びC)を設定した。

(2) 調査方法

葉幅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、立毛状態で実施した。測定方法は、葉の片側のみ(以下、片側葉幅)を測定し、その値を2倍して葉幅とする方法¹⁵⁾で実施した。測定対象は葉幅10 cm以上(片側葉幅5 cm以上)の展開葉とした。本研

究の葉位は、葉幅10 cm以上の最も若い葉を第1葉とし、茎頂部から数えて降順に第1葉、第2葉、第3葉、…、第18葉と定義した。また、併せて花・果房についても茎頂部から数えて降順に第1、第2、…、第6果房等と番号を付した。ここでは、蕾から果実が直径1 cm未満までの状態を花房、それ以後の状態を果房と分類し、両者をダブルカウントしなかった。葉幅調査時には、花房及び果房の位置を葉位と関連付けて記録した。調査期間は未摘心状態にある10月～4月とし、毎月中旬に実施した。なお、9月に取得したデータは、育苗期～定植直後に発生した著しく小さな葉が混在するため、解析から除外した。

(3) 解析方法

ア データセット

上位葉から降順に第1、第2、…、第18葉と並べて区画(各10株)ごとに葉幅の葉位別平均値を算出し、データセットとした。結果的に、月別、葉位別、区画別の葉幅データを統計処理に供した。

イ 葉幅からLAIを推定する計算方法

葉幅調査をもとに株当たり平均個葉面積を算出し、これに株当たり平均着生葉数(15～18葉)及び栽植密度(2775株 10 a⁻¹)を乗じて推定LAIを導出した。この株当たり平均着生葉数及び栽植密度は、東三河地域のトマト産地で取り組まれる慣行管理方法に準じて設定した。葉幅から個葉面積への変換には、品種別に以下の数式を用いた。

$$\text{「桃太郎ヨーク」: } \text{Ln}(y) = 2.20 \text{ Ln}(W) - 1.96$$

$$\text{「かれん」 : } \text{Ln}(y) = 2.10 \text{ Ln}(W) - 1.46$$

$$\text{「りんか409」 : } \text{Ln}(y) = 2.09 \text{ Ln}(W) - 1.42$$

y: 個葉面積、W: 葉幅、Ln(): ()内の自然対数値とした。これら数式の基本構造は樋江井らの報告⁹⁾に準じた。ただし、「桃太郎ヨーク」については、既報⁹⁾のモデルが十分に適合しなかったため、葉幅及び葉面積データを追加取得して再計算することにより、パラメータを補正した。「かれん」については、関連データを新規に取得し、パラメータを設定した。「りんか409」については、既報⁹⁾のパラメータを変更せずに用いた。なお、パラメータの補正・設定に係る作業工程は記述を省略した。

(4) 試験区の構成

ア 計算手順の検討

葉幅から個葉面積に変換する計算の過程について、異なる2種類の手順(α 及び β)を検討した。手順 α では、測定した葉幅をそれぞれ個葉面積に変換し、これを用いて株当たり平均個葉面積を算出した。手順 β では、測定した葉幅を用いて株当たり平均葉幅を算出し、これを個葉面積に変換して株当たり平均個葉面積とみなした。手順 β は葉幅から個葉面積に変

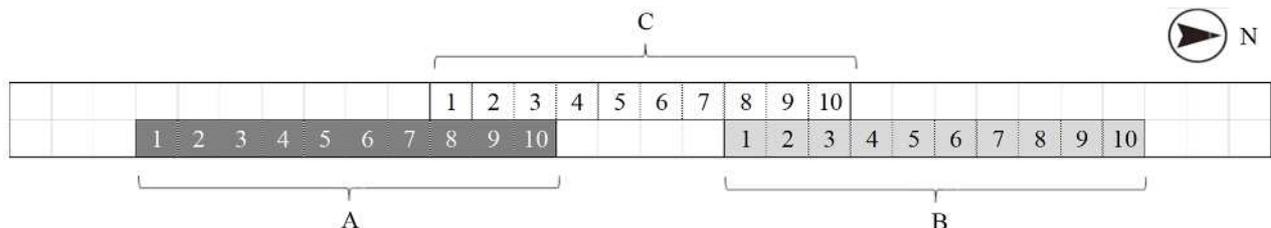


図1 トマト葉幅調査に用いた畝及び試験区画A～C¹⁾

1) 1区画当たり10株とし、株no.を付して同一株を追跡調査した。

換する操作を1回のみで済ませられ、手順αに比べて計算が簡便であるため、検討に加えた。

イ 調査葉位の検討

検討した葉位は、第1葉から第15葉までの各葉位(第n区、n=1~15)、最上位開花花房の直下葉(開花下区)、最上位開花花房から1段下にある果房の直上葉(着果始上区)、同直下葉(着果始下区)、上から1、3、5番目等の花房及び果房の直上葉(第1・3・5花果上区)、同直下葉(第1・3・5花果下区)、同様に偶数番目の花房及び果房の直上葉(第2・4・6花果上区)、同直下葉(第2・4・6花果下区)、全花房及び果房の直上葉(全花果上区)、同直下葉(全花果下区)で、これらを試験区とした。更に手順βでは、全着生葉(全葉区)も設けた。調査葉位の模式図を図2に示した。第n区、開花下区、着果始上区及び着果始下区は、株当たり平均個葉面積を算出するにあたり、1葉のみの測定値が株全体を反映する代表値となり得るかを検討するために設定した。以上の対照区として、手順αに従って得られた全着生葉の個葉面積を積算する全葉積算区を設けた。なお、全葉積算区(対照区)には個葉面積の実測値を積算することが理想であるが、前述のとおり立毛状態での個葉面積の実測は現実的に実施困難であるため、本研究では葉幅から数式で変換した個葉面積を積算して対照区に用いた。

統計処理にはフリーソフトウェアR3.4.2¹⁶⁾及びそのパッケージmultcompを用い、計算手順別に各試験区で算出した推定LAIと全葉積算区のLAIとをDunnnett検定により多重比較した。

(5) 耕種概要

供試品種は、2021年度を「桃太郎ヨーク」(タキイ種苗株式会社、京都)及び「かれん」(株式会社サカタのタネ、神奈川)、2022年度を「りんか409」(株式会社サカタのタネ、神奈川)とし、いずれも接ぎ木せずに自根で用いた。供試作型は、いずれも促成長期栽培とし、2021年度には播種を2021年7月14日、定植を8月10日、収穫を10月18日~2022年5月31日に行い、2022年度には播種を2022年7月14日、定植を8月9日、収穫を10月14日~2023年5月29日に行った。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(養液土耕)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。各株は主枝1本仕立てとし、全ての腋芽を除去した。施肥に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。温度管理は、日中の換気温度を27℃設定、冬期(11月~3月)の暖房開始温度を13℃設定とした。二酸化炭素の施用には燃烧式発生装置(CG-254S2、ネボン株式会社、東京)を用い、12月20~23日から翌年3月31日まで密閉時500 μmol mol⁻¹、換気時400 μmol mol⁻¹を目標に管理した。葉数管理は、収穫中の果房より下方に位置した下葉を全て摘除することで、摘心するまで株当たり15~18葉で維持した。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。

試験2 葉幅の伸張が停止する葉位の解明

同一葉の葉幅を継続的に測定し、上位葉から下位葉へ葉位が移行する中で成長に伴う葉幅の変化を明らかにする。

(1) 試験場所及び試験規模

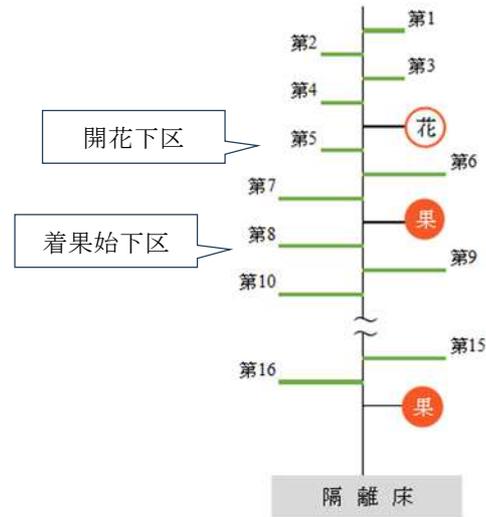


図2 調査葉位の模式図

○花 : 開花花房 ○果 : 果房
 — : 葉幅10cm以上の展開葉(第1~16葉)

試験1における2022年度の栽植株で試験したため、試験場所は試験1(1)と同様である。図1に示した栽植株のうち、隣接する5株(B区画の株no.1~5)を調査株に選定した。

(2) 調査方法

葉幅の測定方法は試験1(2)と同様とした。各調査株の第1葉(葉幅10 cm以上の最も若い葉)の葉柄基部にビニルテープを巻いてマーキングし、これを調査対象葉とした。そして、1~3日ごとに同一葉の葉幅を追跡調査するとともに、その都度、新葉出現に伴って変化する調査対象葉の葉位を記録した。調査時期は2022年9~10月、11~12月、2023年1~2月、3~4月の4回とした。

(3) 耕種概要

試験1の2022年度に栽植した「りんか409」を用いており、試験1(5)に示したとおりである。

試験結果

試験1 LAI推定に有効な計算手順及び好適な調査葉位の検討

(1) 「桃太郎ヨーク」

ア 供試した葉幅データセットの特性

「桃太郎ヨーク」の生育状況(10月撮影)を図3に、月別に調査した葉幅データの一例を図4に示した。図4は2021年10月に調査した結果で、A~C区画の全データ(n=30)を葉位別に一括して集計した。葉位別の平均葉幅は最小13.6 cm(第1葉)~最大56.2 cm(第14葉)で、株当たり平均着生葉数は16.3(標準偏差1.2、以下SD)であった。11~4月の葉幅データについても、葉位別の大きさ及び株内分布は10月のそれと比べて顕著な差異がみられず、株当たり着生葉数は15~18で推移した(データ略)。株当たり花・果房直上(又は直下)の葉は約6枚であった。



図3 供試トマト群落における品種別の生育状況

a: 桃太郎ヨーク(2021年10月撮影)、b: かれん(2021年10月撮影)、c: りんか409(2022年10月撮影)

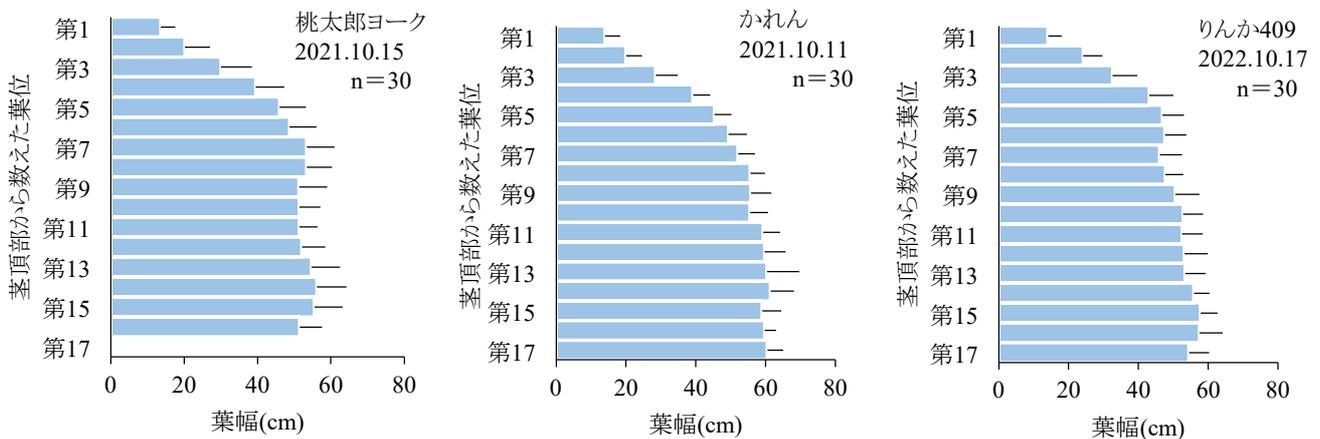


図4 供試トマト群落における品種別の葉幅データ例

エラーバーは標準偏差を示す。

株当たり着生葉数 桃太郎ヨーク: 16.3 ± 1.2 (SD)、かれん: 16.8 ± 1.1 、りんか409: 17.1 ± 0.8

イ 手順αによるLAI推定

手順αに従って算出した試験区別の推定LAIを表1に示した。調査期間を通じて、全花果下区の推定LAIは全葉積算区のそれと有意差が認められなかった。各試験区と全葉積算区との間で算出された平均絶対誤差率(Mean Absolute Percentage Error, 以下MAPE)は全花果下区で最も小さく、6.6%であった。次いでMAPEが小さかった試験区は第1・3・5花果下区、全花果上区の順で、それぞれ10.8%、11.6%であった。

ウ 手順βによるLAI推定

手順βに従って算出した試験区別の推定LAIを表2に示した。調査期間を通じて、全花果下区及び全葉区の推定LAIは全葉積算区のそれと有意差が認められなかった。これら試験区はそれぞれMAPE4.6%及び9.2%で、全花果下区が最も小さかった。全花果下区と葉位が近接する全花果上区のMAPEは17.5%で、全花果下区に比べて顕著に大きな

誤差率を示した。

エ 評価

手順α及び手順βを併せた評価では、手順βによる全花果下区の推定LAIが全葉積算区のLAIと最も近似した。同じ全花果下区でも、手順αより手順βのMAPEが小さかった。

(2)「かれん」

ア 供試した葉幅データセットの特性

「かれん」の生育状況(10月撮影)を図3に、月別に調査した葉幅データの一例を図4に示した。「桃太郎ヨーク」の葉幅と同様に、調査期間を通じて葉位別の大きさ及び株内分布は、期間を通じて大きな変化がみられなかった(データ略)。

イ 手順αによるLAI推定

手順αに従って算出した試験区別の推定LAIを表3に示した。調査期間を通じて、全花果下区の推定LAIは全葉積算区のそれと有意差が認められなかった。各試験区と全葉積算区との間のMAPEは、第7区、第6区、全花果下区の順

表1 トマト「桃太郎ヨーク」において調査葉位の葉幅データから算出した推定葉面積指数(手順 α)¹⁾

調査葉位 ²⁾	株当たり 調査葉数	推定 LAI							MAPE ⁴⁾ (%)
		10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	
第1	1	0.31 ** ³⁾	0.27 **	0.26 **	0.23 **	0.28 **	0.31 **	0.24 **	91.6
第2	1	0.69 **	0.65 **	0.49 **	0.48 **	0.54 **	0.44 **	0.43 **	83.8
第3	1	1.46 **	1.40 **	0.98 **	0.89 **	0.92 **	0.63 **	0.79 **	69.6
第4	1	2.42 *	2.80	2.01 **	1.80 **	1.92 **	1.25 **	0.99 **	44.8
第5	1	3.22	4.14 *	3.13	2.77	2.54	1.61	1.39	21.9
第6	1	3.60	5.01 **	3.65 **	2.95	2.75	1.73	1.41	20.5
第7	1	4.31	5.56 **	4.94 *	3.37 **	3.82	2.30	1.57	18.7
第8	1	4.29	5.57 **	4.92 **	3.81 **	4.13	2.59 **	1.88	18.3
第9	1	3.99	5.58 **	5.22	3.40 **	3.63	2.44 *	1.92	14.5
第10	1	3.97 **	5.55	5.42	4.21 **	4.46	3.10	1.92 *	20.9
第11	1	3.96 *	5.51	5.72 *	4.46 **	4.67 **	3.51 **	2.09 **	24.8
第12	1	4.08 **	5.18	6.15 **	4.00 **	3.83 **	3.33 **	2.23	20.0
第13	1	4.51 **	5.33	6.01	4.48 **	4.71 **	4.10 *	2.38	32.6
第14	1	4.74 **	5.04	6.10 *	4.90 **	4.78 **	4.41 **	2.69 *	38.7
第15	1	4.61 **	4.91	6.06	4.87	3.96 **	3.93 **	2.74	32.0
開花下	1	2.82	3.93	3.90	2.78 *	2.60 **	0.97 **	0.85	28.4
着果始上	1	3.74	5.04 **	4.37 *	2.67	2.74	1.02 **	1.38	23.8
着果始下	1	3.62 *	4.65	4.64 *	4.08 **	4.31 *	2.03 **	1.82 **	16.6
第1・3・5 花果上	3	3.40	4.21	4.49	2.97	2.78	1.96 **	1.53 **	12.7
第1・3・5 花果下	3	3.38	4.44	4.98	4.05	4.17 *	2.82 **	1.88	10.8
第2・4・6 花果上	3	4.01 *	5.37 *	5.41	3.29	3.16	2.34	1.90	14.8
第2・4・6 花果下	3	3.65	4.59	4.94	4.37 **	4.61 **	3.53 **	2.52 *	20.2
全花果上	6	3.54	4.49	4.36	2.96	2.78	2.24 **	1.67 *	11.6
全花果下	6	3.38	4.36	4.50	3.48	4.02	3.29	2.12	6.6
全葉積算	15-18	3.36	4.26	4.43	3.23	3.42	2.89	2.07	—

- 1) 全葉積算区を除き、測定葉幅をそれぞれ個葉面積に変換して株当たり平均個葉面積を計算後、これに株当たり着生葉数及び栽植密度を乗じてLAIを算出した。全葉積算区は、株当たり全個葉面積を積算し、これに栽植密度を乗じてLAIを算出した。
- 2) 第1:茎頂部から数えて展開第1葉(第2~15も同様)、開花下:最上位開花花房の直下葉、着果始上(下):最上位開花花房から1段下にある果房の直上葉(直下葉)、第1・3・5花果上(下):上から第1・3・5花果房の直上葉(直下葉)、第2・4・6花果上(下):上から第2・4・6花果房の直上葉(直下葉)、全花果上(下):全花房・果房の直上葉(直下葉)、全葉積算:全個葉面積の積算
- 3) Dunnett検定による全葉積算区との比較 **: 1% 水準で有意差あり、*: 5% 水準で有意差あり
調査区画(10株)ごとに集計して平均値を算出し、各区 $n=3$ で統計処理した。
- 4) 調査7回分で集計したMAPE (%) = $100/7 \sum (|\text{試験区} - \text{全葉積算区}| / \text{全葉積算区})$

で小さく、それぞれ8.1%、9.7%、9.8%であった。ただし、第7区及び第6区では、全葉積算区との間で有意差がそれぞれ調査7回中に3回及び2回検出された。

ウ 手順 β によるLAI推定

手順 β に従って算出した試験区別の推定LAIを表4に示した。調査期間を通じて、全葉区の推定LAIは全葉積算区のそれと有意差が認められなかった。次いで、第6区、第7区、第8区、第9区、第2花果下区及び全花果下区で有意差検出回数が少なく、いずれも1回であった。MAPEは第7区、全花果下区、全葉区の順に小さく、それぞれ6.8%、8.3%、9.0%であった。全花果下区と葉位が近接する全花果上区のMAPEは16.6%で、全花果下区に比べて大きな誤差率を示した。

エ 評価

手順 α 及び手順 β を併せて、全葉積算区との有意差検出が1回以下かつMAPE10%未満の試験区は、手順 β による第7区、手順 β による全花果下区であった。2種類の手順を比較したとき、同じ調査葉位でも、手順 α より手順 β の推定LAIで全葉積算区のLAIと近似した値が得られた。

(3) 「りんか409」

ア 供試した葉幅データセットの特性

「りんか409」の生育状況(10月撮影)を図3に、月別に調査した葉幅データの一例を図4に示した。「桃太郎ヨーク」の葉幅と同様に、調査期間を通じて葉位別の大きさ及び株内分布は、期間を通じて大きな変化がみられなかった(データ略)。

表2 トマト「桃太郎ヨーク」において調査葉位の葉幅データから算出した推定葉面積指数(手順β)¹⁾

調査葉位 ²⁾	株当たり 調査葉数	推定 LAI							MAPE ⁴⁾ (%)
		10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	
第1	1	0.29 ** ³⁾	0.26 **	0.25 **	0.22 **	0.28 **	0.30 **	0.23 **	91.9
第2	1	0.62 **	0.62 **	0.47 **	0.47 **	0.53 **	0.42 **	0.42 **	84.5
第3	1	1.37 **	1.35 **	0.94 **	0.87 **	0.88 **	0.60 **	0.75 **	71.0
第4	1	2.34 **	2.72 **	1.94 **	1.74 **	1.89 **	1.21 **	0.97 **	46.4
第5	1	3.16	4.07	3.07 **	2.72	2.51 **	1.57 **	1.37 **	23.3
第6	1	3.53	4.92	3.60 *	2.91	2.71 **	1.69 **	1.38 **	20.8
第7	1	4.23 **	5.50 **	4.90	3.32	3.76	2.27 **	1.53 **	18.0
第8	1	4.22 **	5.50 **	4.88	3.77	4.08 **	2.54	1.84	17.8
第9	1	3.91	5.51 **	5.16 *	3.36	3.59	2.40 *	1.89	13.9
第10	1	3.93	5.47 **	5.35 **	4.16 *	4.41 **	3.06	1.86	20.0
第11	1	3.92	5.40 **	5.67 **	4.42 **	4.62 **	3.48 **	2.04	23.6
第12	1	4.03	5.06	6.11 **	4.11 *	3.79	3.29	2.18	19.1
第13	1	4.43 **	5.23 *	5.94 **	4.44 **	4.65 **	4.05 **	2.30	30.4
第14	1	4.66 **	4.96	6.00 **	4.87 **	4.73 **	4.35 **	2.65 **	36.8
第15	1	4.54 **	4.81	6.00 **	4.83 **	3.93	3.89 **	2.68 **	30.3
開花下	1	2.69	3.82	3.81	2.69	2.54 **	0.89 **	0.67 **	31.9
着果始上	1	3.67	4.89	4.30	2.65	2.70 **	0.95 **	0.83 **	27.6
着果始下	1	3.54	4.56	4.58	4.03 *	4.26 **	1.96 **	1.68	16.6
第1・3・5 花果上	3	3.09	3.91	4.18	2.82	2.59 **	1.73 **	1.07 **	21.1
第1・3・5 花果下	3	3.28	4.33	4.86	3.95	4.02 *	2.52	1.81	11.3
第2・4・6 花果上	3	3.92	5.28 *	5.30 **	3.21	3.15	2.16 **	1.46 **	17.6
第2・4・6 花果下	3	3.58	4.51	4.88	4.32 **	4.66 **	3.38 *	2.43	18.1
全花果上	6	3.25	4.18	3.91	2.68	2.58 **	2.03 **	1.36 **	17.5
全花果下	6	3.28	4.21	4.28	3.24	3.79	3.04	2.25	4.6
全葉	15-18	3.06	3.89	3.98	2.91	3.15	2.60	1.88	9.2
全葉積算	15-18	3.36	4.26	4.43	3.23	3.42	2.89	2.07	—

- 1) 全葉積算区を除き、株当たり平均葉幅を計算後に個葉面積変換して株当たり個葉面積とみなし、これに株当たり着生葉数及び栽植密度を乗じてLAIを算出した。全葉積算区は、株当たり全個葉面積を積算し、これに栽植密度を乗じてLAIを算出した。
- 2) 第1: 茎頂部から数えて展開第1葉(第2~15も同様)、開花下: 最上位開花花房の直下葉、着果始上(下): 最上位開花花房から1段下にある果房の直上葉(直下葉)、第1・3・5花果上(下): 上から第1・3・5花果房の直上葉(直下葉)、第2・4・6花果上(下): 上から第2・4・6花果房の直上葉(直下葉)、全花果上(下): 全花房・果房の直上葉(直下葉)、全葉: 全着生葉、全葉積算: 全個葉面積の積算
- 3) Dunnett検定による全葉積算区との比較 ** : 1%水準で有意差あり、* : 5%水準で有意差あり
調査区画(10株)ごとに集計して平均値を算出し、各区n=3で統計処理した。
- 4) 調査7回分で集計したMAPE (%) = $100/7 \sum (|\text{試験区} - \text{全葉積算区}| / \text{全葉積算区})$

イ 手順αによるLAI推定

手順αに従って算出した試験区別の推定LAIを表5に示した。調査期間を通じて、全花果下区の推定LAIは全葉積算区のそれと有意差が認められなかった。各試験区と全葉積算区との間で算出されたMAPEは全花果下区で最も小さく、9.1%であった。次いでMAPEが小さかった試験区は第1・3・5花果下区、第5区の順で、それぞれ11.0%、11.7%であった。

ウ 手順βによるLAI推定

手順βに従って算出した試験区別の推定LAIを表6に示

した。調査期間を通じて、全花果下区及び全葉区の推定LAIは全葉積算区のそれと有意差が認められなかった。これら試験区はそれぞれMAPE5.9%及び9.3%で、全花果下区が最も小さかった。全花果下区と葉位が近接する全花果上区のMAPEは17.6%で、全花果下区に比べて顕著に大きな誤差率を示した。

エ 評価

手順α及び手順βを併せた評価では、手順βによる全花果下区の推定LAIが全葉積算区のLAIと最も近似した。同じ全花果下区でも、手順αより手順βのMAPEが小さかった。

表3 トマト「かれん」において調査葉位の葉幅データから算出した推定葉面積指数(手順 α)¹⁾

調査葉位 ²⁾	株当たり 調査葉数	推定 LAI							MAPE ⁴⁾ (%)
		10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	
第1	1	0.28 ** ³⁾	0.36 **	0.25 **	0.25 **	0.24 **	0.22 **	0.24 **	93.0
第2	1	0.61 **	0.79 **	0.58 **	0.62 **	0.61 **	0.46 **	0.53 **	84.1
第3	1	1.25 **	1.52 **	1.32 **	1.11 **	1.19 **	0.95 **	0.93 **	69.0
第4	1	2.43 *	3.12	2.84 **	2.00 **	2.18 **	1.69 **	1.48 **	41.7
第5	1	3.30	4.48 *	4.01	3.06	3.10	2.32	2.24	17.2
第6	1	3.91	4.43 **	4.60 **	3.23	3.48	2.87	2.27	9.7
第7	1	4.37	5.02 **	5.30 *	3.82 **	3.84	3.34	2.44	8.1
第8	1	5.00	5.27 **	5.09 **	4.04 **	4.09	3.39 **	2.63	11.4
第9	1	5.04	4.79 **	5.45	4.24 **	3.81	3.72 *	2.55	12.7
第10	1	4.96 **	5.20	5.69	4.59 **	4.22	3.81	2.91 *	17.0
第11	1	5.74 *	4.90	5.96 *	4.86 **	4.29 **	3.71 **	3.22 **	22.0
第12	1	5.80 **	4.45	5.48 **	4.94 **	4.40 **	3.96 **	3.50	22.3
第13	1	5.95 **	4.75	5.53	5.16 **	4.52 **	4.40 *	3.56	27.5
第14	1	6.16 **	5.06	5.67 *	5.08 **	5.37 **	4.14 **	4.07 *	34.1
第15	1	5.77 **	5.25	5.46	5.56	5.18 **	3.91 **	3.73	31.1
開花下	1	1.62	2.20	3.20	3.23 *	3.03 **	1.59 **	1.07	40.8
着果始上	1	3.39	4.57 **	4.75 *	3.08	2.98	2.22 **	1.39	22.2
着果始下	1	3.50 *	4.15	4.50 *	4.43 **	4.21 *	3.14 **	2.49 **	10.3
第1・3・5 花果上	3	4.08	3.91	4.42	3.51	3.17	2.34 **	1.93 **	13.9
第1・3・5 花果下	3	3.48	3.71	4.20	4.28	4.51 *	3.36 **	2.58	11.9
第2・4・6 花果上	3	4.77 *	5.01 *	5.27	4.09	3.76	2.91	2.33	12.4
第2・4・6 花果下	3	4.36	4.27	4.55	4.61 **	4.86 **	4.15 **	3.49 *	15.7
全花果上	6	4.33	4.37	4.67	3.34	3.19	2.60 **	2.20 *	10.8
全花果下	6	3.81	3.93	4.26	3.89	4.30	3.74	3.15	9.8
全葉積算	15-18	4.29	4.36	4.40	3.69	3.80	3.28	2.81	—

- 1) 全葉積算区を除き、測定葉幅をそれぞれ個葉面積に変換して株当たり平均個葉面積を計算後、これに株当たり着生葉数及び栽植密度を乗じてLAIを算出した。全葉積算区は、株当たり全個葉面積を積算し、これに栽植密度を乗じてLAIを算出した。
- 2) 第1:茎頂部から数えて展開第1葉(第2~15も同様)、開花下:最上位開花房の直下葉、着果始上(下):最上位開花房から1段下にある果房の直上葉(直下葉)、第1・3・5花果上(下):上から第1・3・5花果房の直上葉(直下葉)、第2・4・6花果上(下):上から第2・4・6花果房の直上葉(直下葉)、全花果上(下):全花房・果房の直上葉(直下葉)、全葉積算:全個葉面積の積算
- 3) Dunnett検定による全葉積算区との比較 **: 1% 水準で有意差あり、*: 5% 水準で有意差あり
調査区画(10株)ごとに集計して平均値を算出し、各区 $n=3$ で統計処理した。
- 4) 調査7回分で集計したMAPE (%) = $100/7 \sum (|\text{試験区} - \text{全葉積算区}| / \text{全葉積算区})$

試験2 葉幅の伸張が停止する葉位の解明

9~10月における新葉の出現・展開に伴って同一葉で観察された葉位の変化を図5に、その葉位ごとにそれぞれ対応した葉幅を図6に示した。9月12日に第1葉であった調査対象葉は、10月31日には第14~15葉に移行した。また、9月12日の第1葉期に葉幅11~26 cmであった葉は、第6葉期に44~53 cmまで成長した。しかし、第6葉期から第15葉期までは、同葉の葉幅にはほぼ変化は認められなかった。11月、1月及び3月に展開した葉も同様な傾向にあった(データ略)。

葉位の変化から算出した新葉出現速度は、9~10月に0.27葉 d^{-1} (=3.7日ごとに1葉)、11~12月及び1~2月に0.23葉 d^{-1} (=4.4日ごとに1葉)、3~4月に0.28葉 d^{-1} (=3.6日ごとに1葉)であった(表7)。葉幅の伸張が停止した葉位は第5~7

葉期に観察された。

考察

1 葉幅からLAI推定するために有効な計算手順及び好適な調査葉位

葉の大きさは栽培期間中の地上部環境、地下部環境、着果負担等の影響を受け、季節や管理状況に応じて変化する^{2,17)}。このため、生育診断又は収量予測等を目的に葉幅からLAIを推定する場合、立毛状態での葉幅調査を定期的を実施する必要がある。本研究では、促成長期栽培においてハイワイヤー誘引された草高200~220 cmのトマト植物体を対象に株

表4 トマト「かれん」において調査葉位の葉幅データから算出した推定葉面積指数(手順β)¹⁾

調査葉位 ²⁾	株当たり 調査葉数	推定 LAI							MAPE ⁴⁾ (%)
		10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	
第1	1	0.30 ** ³⁾	0.33 **	0.23 **	0.23 **	0.23 **	0.20 **	0.20 **	93.5
第2	1	0.60 **	0.77 **	0.57 **	0.60 **	0.60 **	0.43 **	0.50 **	84.6
第3	1	1.23 **	1.50 **	1.30 **	1.10 **	1.17 **	0.97 **	0.87 **	69.5
第4	1	2.40 **	3.03 **	2.80 **	2.00 **	2.13 **	1.63 **	1.47 **	42.6
第5	1	3.23 **	4.40	3.97	3.03 *	3.07 *	2.27 **	2.20 *	17.9
第6	1	3.87	4.40	4.53	3.17	3.43	2.83	2.23 *	10.3
第7	1	4.30	4.93	5.20 *	3.73	3.83	3.30	2.43	6.8
第8	1	4.93	5.17 **	5.03	4.00	4.07	3.33	2.60	10.3
第9	1	5.00	4.73	5.37 **	4.20	3.77	3.70	2.53	12.1
第10	1	4.93	5.10 **	5.60 **	4.53 **	4.17	3.77	2.87	15.5
第11	1	5.67 **	4.80	5.90 **	4.83 **	4.27	3.63	3.17	20.4
第12	1	5.77 **	4.43	5.40 **	4.87 **	4.33	3.90	3.47 **	21.0
第13	1	5.63 **	4.70	5.43 **	5.10 **	4.47	4.33 **	3.57 **	25.3
第14	1	6.13 **	5.03 *	5.60 **	5.07 **	5.33 **	4.10 **	4.00 **	33.0
第15	1	5.67 **	5.20 **	5.33 **	5.47 **	5.10 **	3.87	3.70 **	29.2
開花下	1	1.50 **	2.13 **	3.13 **	3.20	2.93 **	1.53 **	1.03 **	42.5
着果始上	1	3.27 **	4.50	4.70	3.03	2.97 *	2.20 **	1.37 **	22.6
着果始下	1	3.43 *	4.10	4.43	4.37	4.17	3.10	2.47	10.3
第1・3・5 花果上	3	3.47 *	3.47 **	4.03	3.30	2.97 *	2.07 **	1.67 **	22.6
第1・3・5 花果下	3	3.27 **	3.50 **	4.07	4.20	4.37	3.13	2.33	14.5
第2・4・6 花果上	3	4.63	4.93	5.20 *	3.93	3.67	2.83	2.23 *	11.9
第2・4・6 花果下	3	4.27	4.20	4.47	4.57 **	4.80 **	4.07 **	3.37 *	14.2
全花果上	6	3.83	4.03	4.33	2.97	2.93 **	2.40 **	2.03 **	16.6
全花果下	6	3.57 *	3.77	4.13	3.63	4.03	3.57	2.97	8.3
全葉	15-18	3.87	4.03	4.00	3.33	3.47	2.97	2.57	9.0
全葉積算	15-18	4.29	4.36	4.40	3.69	3.80	3.28	2.81	—

- 1) 全葉積算区を除き、株当たり平均葉幅を計算後に個葉面積変換して株当たり個葉面積とみなし、これに株当たり着生葉数及び栽植密度を乗じてLAIを算出した。全葉積算区は、株当たり全個葉面積を積算し、これに栽植密度を乗じてLAIを算出した。
- 2) 第1:茎頂部から数えて展開第1葉(第2～15も同様)、開花下:最上位開花房の直下葉、着果始上(下):最上位開花房から1段下にある果房の直上葉(直下葉)、第1・3・5花果上(下):上から第1・3・5花果房の直上葉(直下葉)、第2・4・6花果上(下):上から第2・4・6花果房の直上葉(直下葉)、全花果上(下):全花房・果房の直上葉(直下葉)、全葉:全着生葉、全葉積算:全個葉面積の積算
- 3) Dunnett検定による全葉積算区との比較 **:1%水準で有意差あり、*:5%水準で有意差あり
調査区画(10株)ごとに集計して平均値を算出し、各区n=3で統計処理した。
- 4) 調査7回分で集計したMAPE (%) = $100/7 \sum (|試験区 - 全葉積算区| / 全葉積算区)$

当たり着生葉15～18枚全ての葉幅を毎月調査した。その結果、測定方法に片側葉幅¹⁵⁾を採用して簡略化を図ったものの、葉を損傷しないように気遣いながら、1株ごとに高所作業車の昇降を繰り返して測定及び筆記したため、毎回5株(計75～90葉)当たり約1時間を要した。このように、測定作業の負担は軽視できず、葉幅からLAIを推定するには調査対象を全葉とせず、調査葉位の選定(標本の抽出)による効率化が不可欠と考えられる。本稿では、葉幅からトマトLAIを推定するために2種類の計算手順で調査葉位を各種組み合わせで検討した。

葉幅から個葉面積に変換する手法は既に確立済みであるが、葉幅と個葉面積との関係は単純な線形を示さず、べき乗関

数(allometry)に従う^{5,18)}。このため、多様な大きさの葉で構成されるトマト植物体(未摘心状態)において、各葉幅の算術平均で得られた株当たり平均葉幅から変換した個葉面積(手順βによる株当たり平均個葉面積)は、あらかじめ各葉幅から変換しておいた各個葉面積の平均値(手順αによる株当たり平均個葉面積)と一致しないことが予想された。そこで、手順βによる全葉区の推定LAI(手順βによる株当たり個葉面積利用)と全葉積算区のLAI(手順αによる株当たり平均個葉面積利用)を比較した結果、いずれの品種も期間を通じて前者は後者に比べて常に小さい値を示して一致せず、過小評価された。一方、葉幅及び個葉面積は、両者を対数変換することにより線形関係

表5 トマト「りんか409」において調査葉位の葉幅データから算出した推定葉面積指数(手順 α)¹⁾

調査葉位 ²⁾	株当たり 調査葉数	推定 LAI							MAPE ⁴⁾ (%)
		10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	
第1	1	0.33 ***)	0.30 **	0.30 **	0.26 **	0.24 **	0.22 **	0.27 **	92.9
第2	1	1.00 **	0.71 **	0.77 **	0.66 **	0.58 **	0.56 **	0.57 **	82.4
第3	1	1.85 **	1.74 **	1.41 **	1.47 **	1.13 **	1.06 **	1.13 **	64.4
第4	1	3.24 *	3.70	2.70 **	2.81 **	2.23 **	2.00 **	2.02 **	32.1
第5	1	3.82	5.07 *	4.59	4.47	3.47	3.25	2.78	11.7
第6	1	3.95	5.24 **	5.22 **	4.91	4.02	3.51	2.88	12.2
第7	1	3.70	5.21 **	5.05 *	5.44 **	4.05	3.40	3.54	14.5
第8	1	3.95	5.21 **	5.56 **	5.51 **	4.71	4.49 **	3.88	21.9
第9	1	4.49	5.22 **	4.86	5.48 **	4.71	4.25 *	3.75	19.2
第10	1	4.87 **	4.41	4.71	5.69 **	4.65	4.09	4.19 *	19.0
第11	1	4.82 *	4.22	5.02 *	6.12 **	5.36 **	4.96 **	4.31 **	27.1
第12	1	4.97 **	4.47	5.09 **	5.43 **	5.28 **	4.76 **	3.66	22.5
第13	1	4.98 **	4.08	4.70	5.82 **	5.39 **	4.27 *	3.87	20.4
第14	1	5.45 **	4.06	5.01 *	5.65 **	6.02 **	4.86 **	4.19 *	28.5
第15	1	5.86 **	4.69	4.76	4.94	5.41 **	4.42 **	3.66	22.8
開花下	1	3.33	3.73	3.45	3.56 *	2.58 **	2.23 **	2.72	21.3
着果始上	1	3.89	5.33 **	4.98 *	4.51	3.21	2.49 **	2.38	19.6
着果始下	1	3.27 *	4.37	5.01 *	5.80 **	5.19 *	4.60 **	4.27 **	24.1
第1・3・5花果上	3	4.00	3.96	4.26	4.29	3.38	2.58 **	2.05 **	13.0
第1・3・5花果下	3	3.94	3.66	3.94	4.78	5.13 *	4.46 **	3.37	11.0
第2・4・6花果上	3	4.85 *	4.95 *	4.57	4.93	3.91	3.00	2.46	15.9
第2・4・6花果下	3	3.89	3.99	4.73	5.50 **	5.60 **	4.95 **	4.14 *	21.2
全花果上	6	4.44	4.18	4.21	4.26	3.27	2.51 **	2.24 *	14.5
全花果下	6	3.91	3.70	4.17	4.72	4.57	4.12	3.74	9.1
全葉積算	15~18	4.02	4.03	4.08	4.42	4.12	3.58	3.20	—

- 1) 全葉積算区を除き、測定葉幅をそれぞれ個葉面積に変換して株当たり平均個葉面積を計算後、これに株当たり着生葉数及び栽植密度を乗じてLAIを算出した。全葉積算区は、株当たり全個葉面積を積算し、これに栽植密度を乗じてLAIを算出した。
- 2) 第1:茎頂部から数えて展開第1葉(第2~15も同様)、開花下:最上位開花花房の直下葉、着果始上(下):最上位開花花房から1段下にある果房の直上葉(直下葉)、第1・3・5花果上(下):上から第1・3・5花果房の直上葉(直下葉)、第2・4・6花果上(下):上から第2・4・6花果房の直上葉(直下葉)、全花果上(下):全花房・果房の直上葉(直下葉)、全葉積算:全個葉面積の積算
- 3) Dunnett検定による全葉積算区との比較 **: 1% 水準で有意差あり、*: 5% 水準で有意差あり
調査区画(10株)ごとに集計して平均値を算出し、各区 $n=3$ で統計処理した。
- 4) 調査7回分で集計したMAPE (%) = $100/7 \sum (|試験区 - 全葉積算区| / 全葉積算区)$

が成立する。そこで予備試験として、対数変換後の算術平均(幾何平均と同義)による株当たり平均葉幅の算出を試みた。その結果、幾何平均は前述の全葉区(手順 β)より更に小さい値を示し、全葉積算区との乖離程度が拡大した(データ略)。このことから、本研究における幾何平均の導入は不適と判断し、その後の検討から除外した。

試験1では、算術平均を用いる2種類の計算手順及び調査葉位について検討した結果、品種・作期を通じて計算手順を β とし、調査葉位を全花果下区とする方法が安定的に高い精度でLAIを推定できるものと考えられた。手順 β による全葉区では、平均葉幅を算出する過程で小さな葉(第1~5葉)が強く影響し、その推定LAIは全葉積算区のLAIに比べて小さい値となった。しかし、全花果下区では、第1~5葉のうち計

算に含める小さな葉が1枚のみであったことから、算出される推定LAIは過小評価されにくいものと推察された。花房及び果房の近傍葉として全花果上区についても検討したが、全花果下区に比べて顕著に推定精度が低かった。宍戸¹⁹⁾は、概してトマトの花房(果房)の直上葉が同一株内の上下に着生した葉に比べて小さいことを指摘しており、本研究でも葉幅調査時において同様な特性が観察された。全花果上区によるLAI推定誤差が全花果下区に比べて大きくなったのは、このような特性に起因したものと推測される。また、全花果下区の更なる簡略化を試み、調査葉数を削減した第1・3・5花果下区及び第2・4・6花果下区についても検討したが、それらの誤差率は全花果下区に比べて明らかに大きかった。1葉のみの調査結果が株全体を反映し得るか否かについても検

表6 トマト「りんか409」において調査葉位の葉幅データから算出した推定葉面積指数(手順β)¹⁾

調査葉位 ²⁾	株当たり 調査葉数	推定 LAI							MAPE ⁴⁾ (%)
		10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	
第1	1	0.30 ** ³⁾	0.30 **	0.27 **	0.23 **	0.23 **	0.20 **	0.27 **	93.4
第2	1	0.93 **	0.70 **	0.73 **	0.63 **	0.53 **	0.53 **	0.57 **	83.1
第3	1	1.77 **	1.67 **	1.37 **	1.43 **	1.10 **	1.03 **	1.10 **	65.6
第4	1	3.13 **	3.60	2.67 **	2.77 **	2.17 **	1.93 **	1.97 **	33.8
第5	1	3.77	4.97 *	4.53	4.43	3.40	3.20	2.73	11.9
第6	1	3.83	5.17 **	5.13 **	4.83	3.90	3.40	2.83	12.8
第7	1	3.63	5.10 *	4.97 *	5.37 **	3.90	3.33	3.47	14.3
第8	1	3.90	5.17 **	5.47 **	5.47 **	4.67	4.43 **	3.80	20.7
第9	1	4.40	5.17 **	4.77	5.40 **	4.63	4.20	3.67	17.3
第10	1	4.77 *	4.33	4.60	5.60 **	4.60	4.00	4.07 *	16.5
第11	1	4.77 *	4.17	4.97 *	6.03 **	5.30 **	4.90 **	4.17 *	25.1
第12	1	4.87 **	4.37	5.00 **	5.33 **	5.20 *	4.63 **	3.60	20.1
第13	1	4.90 **	4.00	4.57	5.73 **	5.33 **	4.13	3.80	18.3
第14	1	5.43 **	3.97	4.97 *	5.57 **	5.93 **	4.80 **	4.10 *	27.2
第15	1	5.83 **	4.60	4.70	4.83	5.33 **	4.27 *	3.63	20.8
開花下	1	2.77 **	2.93 **	4.50	4.70	3.43	2.83 *	2.60	18.8
着果始上	1	3.83	5.27 **	4.60	4.67	3.17 *	2.43 **	2.33 *	19.4
着果始下	1	3.20 **	4.33	5.20 **	5.80 **	5.10 *	4.53 **	4.17 *	23.9
第1・3・5 花果上	3	3.67	3.60	4.30	4.23	3.13 *	2.40 **	1.83 **	18.4
第1・3・5 花果下	3	3.83	3.53	4.03 *	5.03	4.97	4.33 *	3.03	11.3
第2・4・6 花果上	3	4.73 *	4.87	4.93	5.07 *	3.80	2.97	2.40	17.7
第2・4・6 花果下	3	3.83	3.93	4.57	5.47 **	5.50 **	4.83 **	4.03 *	19.6
全花果上	6	4.17	3.80	4.13	3.87	2.93 **	2.30 **	2.07 **	17.6
全花果下	6	3.83	3.53	3.73	4.40	4.10	3.77	3.50	5.9
全葉	15~18	3.70	3.67	3.73	4.00	3.70	3.20	2.90	9.3
全葉積算	15~18	4.02	4.03	4.08	4.42	4.12	3.58	3.20	—

- 1) 全葉積算区を除き、株当たり平均葉幅を計算後に個葉面積変換して株当たり個葉面積とみなし、これに株当たり着生葉数及び栽植密度を乗じてLAIを算出した。全葉積算区は、株当たり全個葉面積を積算し、これに栽植密度を乗じてLAIを算出した。
- 2) 第1:茎頂部から数えて展開第1葉(第2~15も同様)、開花下:最上位開花花房の直下葉、着果始上(下):最上位開花花房から1段下にある果房の直上葉(直下葉)、第1・3・5花果上(下):上から第1・3・5花果房の直上葉(直下葉)、第2・4・6花果上(下):上から第2・4・6花果房の直上葉(直下葉)、全花果上(下):全花果房・果房の直上葉(直下葉)、全葉:全着生葉、全葉積算:全個葉面積の積算
- 3) Dunnett検定による全葉積算区との比較 **:¹%水準で有意差あり、*:⁵%水準で有意差あり
調査区画(10株)ごとに集計して平均値を算出し、各区n=3で統計処理した。
- 4) 調査7回分で集計したMAPE (%) = $100/7 \sum (| \text{試験区} - \text{全葉積算区} | / \text{全葉積算区})$

討したが、品種・作期を通じて安定した調査葉位は見出せなかった。従って、LAI推定には、全ての花房及び果房の直下葉を対象に調査すべきと考えられた。本稿は1品種当たり1作ずつの試験結果から論じたものであるが、異なる年次に3品種から促成長期栽培において同様な調査葉位が好適と選出された。このことから、結果の汎用性は高いと考えられる。ただし、その他の品種・作型等、トマト栽培全般に通底する普遍性の検証は必要であろう。

2 LAI推定に最適な葉幅調査の時期

試験2において同一葉の葉幅を追跡調査した結果、新葉が

展開して第6~7葉期に達する頃には、葉幅の伸展が停止することを明らかにした。安ら²⁰⁾は、キュウリにおける個葉面積の増大が第10葉付近で停止することを報じており、本研究のトマトで観察された事象と合致した。従って、葉が混み合う前の第6~7葉期に果房直下の葉幅を測定し果房別に記録しておくことで、LAI推定時に必要なデータを繰り返し利用することが可能である。つまり、LAI推定では全ての花房及び果房の直下葉を調査対象とするが、葉幅測定を展開途上の若い葉のみに限定し、葉幅の伸展が停止した葉位については調査済みの蓄積した葉幅データを適宜計算に用いることで省力化し得ると考えられた。

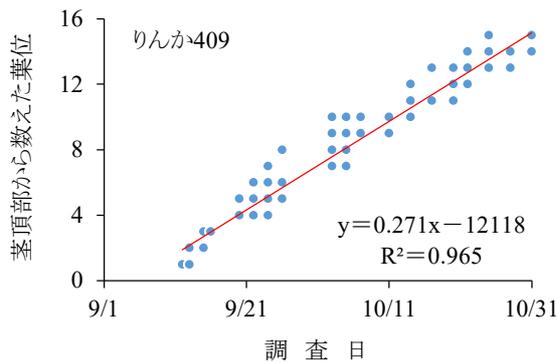


図5 同一葉の追跡調査にみる新葉展開に伴う葉位の経日変化¹⁾(調査対象葉 n=5)

1) 図中の回帰式は日付データを Excel のシリアル値に変換して算出した。

3 葉幅測定によるトマトLAIの推定技術まとめ

本研究と同様なコンセプトに基づくトマトのLAI簡易推定方法は、宮城県²¹⁾及び長崎県²²⁾からも報告事例があり、前者(以下、宮城県方式)は葉長、葉幅、着生葉数及び栽植密度を、後者(以下、長崎県方式)は葉幅、着生葉数及び栽植密度を変数として使用する。宮城県方式では、茎頂部から数えて第10葉～最下葉のうち中庸な葉1枚を任意に選定して計算に用いることとしている。しかし、図3にみられるように、葉が混み合っただけで個葉の大きさを識別しにくい中～下位葉から中庸な葉1枚を選出する作業は、調査者により推定値のばらつきが大きくなるものと推測される。本研究の試験1においても、1葉のみの抽出調査で株全体を代表させることがいかに難しいかを示す結果が得られている。長崎県方式では、品種を「麗容」に限定し、茎頂部から数えて第8葉以下の葉から算出した平均葉幅を用いることとしているが、株当たり着生葉数を15～18枚で管理している場合、毎回混み合った中～下位葉8～11枚の葉幅を測定しなければならず、調査者の負担は大きいものと考えられる。なお、茎頂部から数えて第7葉までの合計葉面積は、実測に基づく品種固有値(定数)を利用することであった。

一方、本研究のLAI推定技術では、葉位の定義方法及び推定に用いる変数(葉幅、着生葉数及び栽植密度)は他県の方式と同様であるが、調査葉位及び調査時期を明確にしたこと、葉幅測定を片側にしたこと、更に生育診断支援ツール^{14,15)}を利用することによって他者と差別化でき、一層の作業簡略化、精度向上が期待できる。なお、前述の生育診断支援ツールには、画像を用いて葉幅を測定する機能、葉幅から個葉面積を推定する演算機能、葉位別の葉幅を記録する機能が実装されている。ただし、現時点における葉幅の画像測定精度はやや低いことから¹⁵⁾、葉幅測定はメジャーによる手作業とし、測定を除いた各種演算及びデータ管理作業のみを生育診断支援ツールに担わせるような部分的な利用が合理的な方法と考えられる。

一般にトマト栽培の生育診断指標として扱われるLAI¹⁴⁾は、定常状態にある完成した群落(定期的な下葉除去が繰り返される未摘心の期間)を対象としている。本研究の作型では、この状態が10月～4月にあたり、調査期間に合致する。こ

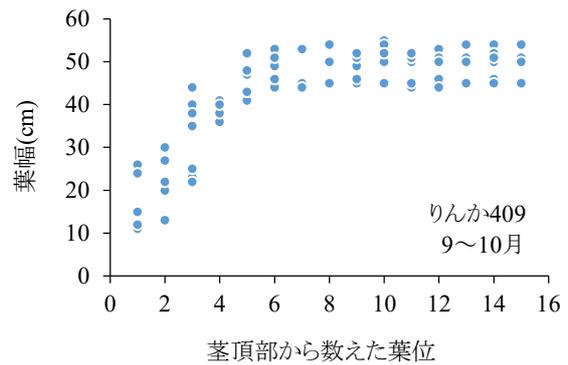


図6 同一葉の追跡調査にみる葉位の移行に伴う葉幅の変化(調査対象葉 n=5)

表7 トマト葉幅の伸展停止葉位¹⁾

調査月	新葉出現速度 ²⁾ (葉 d ⁻¹)	新葉の出現までに要した日数	葉幅の伸展が停止した葉位 ³⁾
9～10月	0.27	3.7	第6葉
11～12月	0.23	4.4	第5葉
1～2月	0.23	4.4	第6葉
3～4月	0.28	3.6	第7葉

1) 品種「りんか409」、調査対象は葉幅10 cm以上の葉

2) 1日当たり出現新葉数

3) 茎頂部から数えた葉位の中央値 (n=5)

れまでLAIを容易に把握する手段がなかったことから、定植直後から収穫開始までの群落形成期(LAI増加期)におけるLAIの生育診断基準は明らかでない。一方、トマト栽培では、定植から第3花房開花期頃までの生育初期における肥培管理が体質を決定し、その後の収量・品質に強く影響を及ぼすとされる²³⁾。この期間については、本技術によるLAI推定は困難であるが、診断基準となる好適なLAI増加曲線やその至適域也未確立であり、現時点においてLAIの診断利用は現実的でない。また、摘心後については、栄養成長が行われず、葉群が更新されないことから、LAIによる生育診断は不要と考えられる。ただし収量予測の観点に立てば、必要に応じて摘心後の群落における本技術の適用可否も検証すべきと考えられる。

冒頭でも述べたが、トマトのLAIは生育診断及び収量予測に利用可能な生育指標である¹⁴⁾。本技術は汎用性の高いスマートフォンの活用を想定しており、生産及び研究の現場で容易に取り組みのものと考えられる。また、現場におけるスマートフォン活用は、葉幅からのLAI推定はもとより、生育診断及び収量予測等の各種クラウドサービス利用による分析、診断、予測へのシームレスな展開を実現しやすいものと期待される。最後に、葉幅調査からLAI計算に至る一連の方法を整理して以下に示した。

[具体的な方法]

① 調査葉の選定:葉幅調査の対象は、葉幅10 cm以上(片側葉幅5 cm以上)で、全ての花房及び果房の直下葉と

- する(株当たり6枚程度)。ただし、この花房は蕾の状態を含む。
- ② 葉幅の測定:測定時には、片側葉幅(調査しやすい任意の片側)を測定し、これを2倍して葉幅とする方法が簡便である。なお、葉幅調査は定期的実施し、葉が混み合う前の第6~7葉期に果房直下の葉幅を測定・記録しておく。LAI推定時には、花房及び果房の直下にある第1~6葉(若い葉)のみを測定し、それより下位の葉は既に蓄積された葉幅データを使用する。
 - ③ 株当たり平均個葉面積の計算:これら葉幅の算術平均(≒株当たり平均葉幅)を求めた後で個葉面積に変換し、“株当たり平均個葉面積”とみなす。
 - ④ LAIの計算:株当たり平均個葉面積に、株当たり着生葉数及び栽植密度を乗じてLAIを算出する。なお、この方法による誤差の程度は品種によって異なるものの、MAPE4.6~8.3%であった。従って、平均誤差はLAI=3の場合に±0.14~0.25、LAI=4の場合に±0.18~0.33、LAI=5の場合に±0.23~0.42程度と算定される。

引用文献

1. Heuvelink, E., Bakker, M.J., Elings, A., Kaarsemaker, R.C. and Marcelis, L.F.M. Effect of leaf area on tomato yield. *Acta Horticulturae*. 691, 43-50(2004)
2. 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)
3. 水上宏二, 徳永恵美. 促成トマトにおける栽培支援システムの開発. *園学研*. 20別1, 245(2021)
4. Saito, T., Mochizuki, Y., Kawasaki, Y., Ohyama, A. and Higashide, T. Estimation of leaf area and light-use efficiency by non-destructive measurements for growth modeling recommended leaf area index in greenhouse tomato. *The Horticulture Journal*. 89(4), 445-453(2020)
5. 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)
6. 山本晴彦, 鈴木義則, 早川誠而. プラントキャノピーアナライザーを用いた作物個体群の葉面積指数の推定. *日作紀*. 64(2), 333-335(1995)
7. 大石直記. 散乱光センサによるトマト葉面積指数の非破壊評価. *植物環境工学*. 28(3), 125-132(2016)
8. 大山暁男, 望月祐哉, 梅田大樹, 黒崎秀仁, 斎藤岳士, 河崎靖, 東出忠桐, 岩崎泰永. トマト分離集団を用いた草高と葉面積の非破壊測定の精度評価. *園学研*. 16別1, 328(2017)
9. 篠原洋太, 岩崎泰永, 江口雅丈, 岩崎亘典, 坂本利弘, 石塚直樹. デジタルカメラ画像を利用したトマト三次元群落情報解析~草高および葉面積の推定~. *園学研*. 18別1, 334(2019)
10. Mendes, J., Pinho, T.M., Neves dos Santos, F., Sousa, J., Peres, E., Cunha, J., Cunha, M. and Morais, R. Smartphone applications targeting precision agriculture practices — a systematic review. *Agronomy*. 10(6), 855(2020)
11. Kaplan, G., Fine, L., Lukyanov, V., Manivasagam, V.S., Malachy, N., Tanny, J. and Rozenstein, O. Estimating processing tomato water consumption, leaf area index, and height using Sentinel-2 and VENμS imagery. *Remote Sensing*. 13(6),1046(2021)
12. 磯田七海, アベミツテル, 福田直也, アランニャクラウス, 今倉暁, 櫻井鉄也, 藤内直道. 機械学習と画像セグメンテーションに基づく温室栽培トマト群落の葉面積指数推定. *園学研*. 21別2,160(2022)
13. Baar, S., Kobayashi, Y., Horie, T., Sato, K., Suto, H. and Watanabe, S. Non-destructive leaf area index estimation via guided optical imaging for large scale greenhouse environments. *Computers and Electronics in Agriculture*. 197, 106911(2022)
14. 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.(2024.4.10参照)
15. 樋江井清隆, 小川理恵, 大川浩司. 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. *愛知農総試研報*. 55, 21-28(2023)
16. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. (2017). <https://www.R-project.org/>
17. 斎藤隆. 栄養生長の生理,生態. *農業技術大系野菜編* 2. トマト. 農文協. 東京. p.基29-51(1973)
18. Schwarz, D. and Kläring, H.P. Allometry to estimate leaf area of tomato. *J. Plant Nutr.* 24, 1291-1309(2001)
19. 宍戸良洋編. 光合成産物の転流と分配. 養賢堂. 東京. p.65-85(2016)
20. 安東赫, 東出忠桐, 岩崎泰永, 河崎靖, 中野明正. 施設キュウリのハイワイヤー栽培におけるLAI簡易推定. *野菜茶業研究所研究報告*. 14, 23-29(2015)
21. 宮城県農業・園芸総合研究所. トマト葉面積指数(LAI)の簡易推定法. 宮城県「普及に移す技術」. 第96号, 5-7(2021)
22. 長崎県農林技術開発センター. トマト「麗容」の葉面積指数の推定方法. *試験研究成果情報*. (2021) <https://www.pref.nagasaki.jp/e-nourin/nougi/theme/result/9.html>(2024.3.30参照)
23. 村松安男. 高品質・高糖度のトマトづくり. *農文協*. 東京. p.22-50(1992)