

トマト葉面積指數の簡易推定技術の改良

延命直紀¹⁾・伊藤 緑²⁾・山田健太郎¹⁾・長屋浩治¹⁾・犬飼瑠伽³⁾・田中哲司⁴⁾

摘要:トマトの葉面積指數(以下、LAI)を簡易に推定することを目的とし、全ての花房及び果房(以下、花果房)直下葉の平均葉幅を簡便に推定するための調査間隔及び調査葉数について検討した。また、同調査方法により推定した平均葉幅から算出したLAIと、葉面積実測により算出したLAIを比較して、精度を検証した。その結果、4週間おきに上位4枚の花果房直下葉の葉幅(10 cm以上)を調査し、下位の花果房については、既に調査済みの葉幅データを用いることで、全ての花果房直下葉の平均葉幅を平均絶対誤差率5%以内で推定できた。また、推定した平均葉幅を株当たり個葉面積に変換し、着生葉数及び栽植密度を乗じることで、平均絶対誤差率5%以内でLAIを推定することができた。

キーワード:葉面積指數、葉幅、トマト

緒言

近年、施設園芸分野では担い手の減少や高齢化が進むなか、環境モニタリング装置やセンシング、生育調査等により得られたデータを活用し、栽培技術や経営の最適化を図り、生産性や収益向上に繋げる「データ駆動型農業」の実践が求められている。これらのデータの中でも、葉面積指數(以下、LAI)は収量を構成する要素のひとつであり、生育状況や収量を予測に活用することで、作業計画の立案や生産効率の向上に寄与することが報告されている¹⁾。トマト栽培においては、LAIが摘葉作業などの栽培管理の判断に利用され、好適なLAIに制御することで、果実の玉揃いや着色の向上、さらに多収が可能となる²⁾。しかし、LAIを経時的に測定するには多くの手間と時間を要するため、簡易に推定する技術の確立が必要である。

これまでの研究において、樋江井ら³⁾は、トマトの全ての花房及び果房(以下、花果房)直下葉の葉幅を測定し、葉幅の算術平均(以下、平均葉幅)からLAIを推定する技術を開発した。さらに、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。

これらのことから、花果房直下葉のうち、伸展が継続している上位の葉幅のみを定期的に測定し、伸展が停止した下位の花果房直下葉については、既に調査済みの葉幅データを活用することで、全ての花果房直下葉の平均葉幅を推定でき、LAIを簡易にかつ精度よく推定できると考えた。この方法を実用化するために、上位の花果房直下葉の葉幅の効率的な調査間隔や調査葉数を明らかにする必要がある。

そこで本研究では、全ての花果房直下葉の平均葉幅を簡易に推定するために、測定する上位の花果房直下葉の葉幅の最適な調査間隔と調査葉数について検討した。さらに、同調査方法により推定した平均葉幅に基づいて推定したLAIと実測した葉面積から算出したLAIを比較し、精度を検証した。

材料及び方法

1 供試作物及び耕種概要

試験場所は愛知県農業総合試験場内のPOフィルム被覆ハウス(間口14.2 m、奥行18.7 m、軒高3.5 m)とした。供試品種として、穂木「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、清須)に接ぎ木して用いた。作型は促成長期栽培とし、播種は2023年7月18日、接木は8月4・5日、定植は8月22日に行った。収穫は11月2日から翌年5月31日まで行い、5月7日に生長点を摘芯した。栽培方式は砂壌土を詰めた隔離床における灌水施肥栽培とし、栽植様式は株間20 cm、畝間180 cm、栽植密度2,778 株/m²の1条振り分けで、主枝1本のつるおろし誘引を行った。施肥は園試処方と同一組成の液肥に微量要素(OATハウス5号、OATアグリオ株式会社、東京)を加えたものを用い、生育に応じて株当たり窒素25~150 mg/日を施用した。温度管理は、日中の換気温度を25°C、暖房温度を12°Cに設定した。二酸化炭素施用には、燃焼式発生装置(CG-254S2、ネポン株式会社、東京)を用い、11月14日から翌年4月30日まで換気条件下で400 μmol mol⁻¹、無換気条件下で

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

⁴⁾園芸研究部(現山間農業研究所)

本研究は生研支援センター「戦略的スマート農業技術等の開発・改良」(JPJ011397)の支援を受けて実施した。

500 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ を下回らないように施用した。葉数管理は収穫果房下1枚を残し、以下の葉を全て除去するよう管理することで、生長点を摘芯するまで株当たり21～25葉(花果房直下葉は7～9葉)を維持した。このほか、栽培管理及び防除管理等は当場の慣行に準じた。

2 測定方法

葉幅は、メジャー(KB15、原度器株式会社、小田原)を用い、立毛状態で実寸測定した。葉幅の測定は複葉単位とし、最も長い側小葉の基部から先端までの長さ(以下、片側葉幅)を測定し、その測定値を2倍して葉幅とする方法⁴⁾で実施した。測定対象は葉幅10 cm以上(片側葉幅5 cm以上)の花果房直下にある展開葉とした。

3 調査方法

葉幅の調査は週に1回実施し、各花果房直下に位置する葉の葉幅を上から4枚測定した。なお、樋江井らの報告³⁾による葉幅の伸展が停止する第6～7葉期が、花果房直下葉の上から3枚目の展開時期に該当する。併せて各花果房直下葉に対応する地際からの花果房段数を記録した。これは、平均葉幅の算出時に、下位の花果房直下葉については、地際からの花果房段数と既に調査済みの葉幅データとの対応関係を把握するためである。調査期間は、各花果房直下葉が展開し、測定が可能となる10月12日から摘芯前の5月1日まで実施した。

さらに11月から5月まで月に1回(11月9日、12月7日、1月18日、2月22日、3月13日、4月17日、5月1日)、着生している全ての花果房直下葉の葉幅を測定した。うち11月9日、1月18日、3月13日、5月1日の計4回、LAIの算出に必要な着生葉数(葉幅10 cm以上)を記録した。

調査は3株3反復の計9個体で行った。

4 データの解析

(1) 調査間隔及び調査葉数の検討

3で調査したデータを用い、最適な調査間隔及び調査葉数を検討するため、調査間隔を1週間、2週間、4週間、調査

した花果房直下葉を上から2枚、3枚、4枚とし、それぞれを組み合わせて平均葉幅を算出した。

図1に全花果房及び1週間・4枚での平均葉幅の算出方法を示す。全花果房では、月に1回調査した全ての花果房直下葉の葉幅データを平均した。1週間・4枚では上位4枚の花果房直下葉について、1週間毎の葉幅データを用いて各調査日における全花果房の平均葉幅を算出した。すなわち、平均葉幅の算出日に測定した上位4枚の葉幅データを使用し、それより下位の花果房直下葉については、それぞれの地際からの花果房段数に対応する過去に取得した直近の葉幅データを用いた。

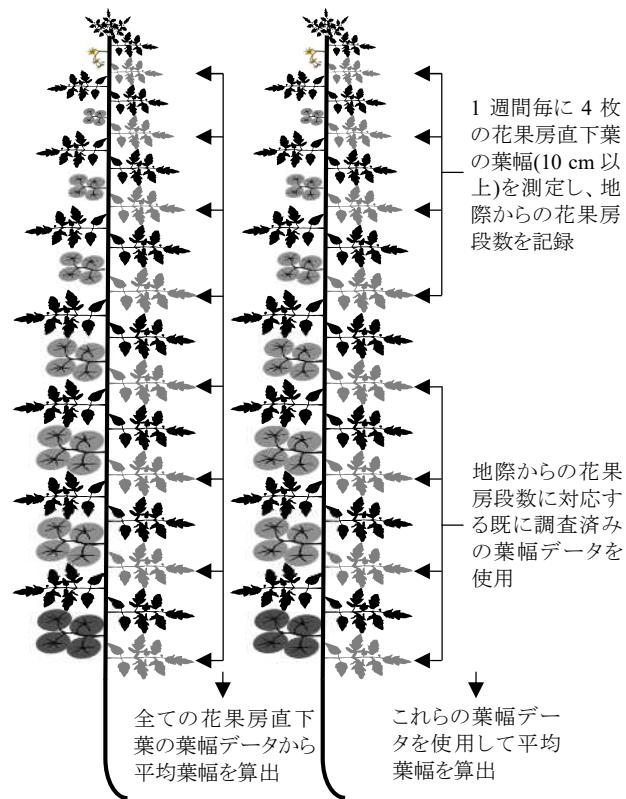


図1 平均葉幅の算出方法
左 全花果房 右 1週間・4枚

表1 1週間毎に上位4枚の花果房直下葉を調査した葉幅及び花果房段数
(3月20日～5月1日)

調査日	花果房直下葉	地際からの花果房段数	葉幅(cm)	調査日	花果房直下葉	地際からの花果房段数	葉幅(cm)	調査日	花果房直下葉	地際からの花果房段数	葉幅(cm)
3月20日	1枚	18段	18	4月10日	1枚	20段	13	4月24日	1枚	21段	24
	2枚	17段	40		2枚	19段	42		2枚	20段	52
	3枚	16段	50		3枚	18段	50		3枚	19段	50
	4枚	15段	48		4枚	17段	47		4枚	18段	52
3月27日	1枚	19段	11	4月17日	1枚	20段	25	5月1日	1枚	22段	15
	2枚	18段	29		2枚	19段	49		2枚	21段	45
	3枚	17段	44		3枚	18段	52		3枚	20段	57
	4枚	16段	51		4枚	17段	48		4枚	19段	50
4月3日	1枚	19段	27					5月1日			
	2枚	18段	48								
	3枚	17段	46								
	4枚	16段	52								

表2 平均葉幅の算出方法
(例 1週間・4枚)

地際からの花果房段数	葉幅(cm)
22段	15
21段	45
20段	57
19段	50
18段	52
17段	48
16段	52
15段	48
5月1日の平均葉幅 ¹⁾	45.9

1) 表1から葉幅データを抽出し算出した5月1日の平均葉幅(色塗り箇所のデータを使用)

表1及び表2に、1週間・4枚における平均葉幅の算出方法を示す。表1は1週間毎に上から4枚の花果房直下葉の葉幅及び花果房段数を調査したデータである。5月1日に平均葉幅を算出する場合は、同日に測定した上から4枚まで(19~22段)の葉幅データを用い、それより下位の花果房直下葉については、既に調査済みの直近の葉幅データを用いる。18段には4月24日、17段には4月17日、16段には4月3日、15段には3月20日にそれぞれ測定した葉幅データを適用した。なお、14段より下の葉は摘葉されているため、本算出には含めない。

(2) 上位の花果房直下葉の葉幅の測定から算出したLAIの精度評価

11月9日、1月18日、3月13日、5月1日に当該ハウスのLAIを推定した。4(1)において、全花果房の平均葉幅及び全花果房と比較して精度が高かった各調査方法の平均葉幅から、樋江井ら^{3,4)}が開発した以下の「りんか[®]409」の推定式を用いて、株当たり平均個葉面積に変換した。変換した株当たり平均個葉面積に、着生葉数及び栽植密度を乗じてLAIを推定した。

$$\text{Ln}(y)=2.09\text{Ln}(w)-1.42$$

y:株当たり平均個葉面積(cm²)、w:平均葉幅(cm)

また、上記で推定したLAIの精度を検証するために、LAIを推定した同日に葉幅10 cm以上の葉を全て採取し、葉面積計(GA-5、東京光電株式会社、東京)を用いて、株当たり葉面積を実測した。株当たり葉面積に栽植密度を乗じてLAIを推定した。葉面積の実測は、葉幅の調査を実施した3株3反復の計9個体のうち、ランダム抽出した1株3反復の計3個体について行った。

結果及び考察

1 調査間隔及び調査葉数の検討

全花果房の平均葉幅及び上位の花果房直下葉を定期的に測定して算出した平均葉幅を表3に示す。

表3 調査方法別花果房直下葉の平均葉幅

調査方法		平均葉幅(cm)							MAPE ³⁾ (%)
調査間隔	調査枚数	11月9日	12月7日	1月18日	2月22日	3月13日	4月17日	5月1日	
1週間	2枚 ¹⁾	35.2	38.0	40.0	40.5	39.9	39.8	38.8	10.1
	3枚	37.5	42.1	44.3	43.5	43.3	43.7	42.2	2.1
	4枚	37.8	42.8	45.0	44.2	44.2	43.6	42.5	1.0
2週間	2枚	32.2	34.8	35.4	36.5	36.6	35.4	34.2	19.1
	3枚	36.9	41.4	43.6	43.1	42.8	42.5	41.1	3.8
	4枚	37.6	42.9	45.0	44.0	44.0	43.5	42.2	1.3
4週間	2枚	- ⁴⁾	-	-	-	-	-	-	-
	3枚	34.2	35.6	38.7	39.0	39.2	38.3	36.1	13.8
	4枚	37.0	40.8	43.9	43.4	43.5	42.8	41.1	3.5
全花果房 ²⁾		37.8	43.9	45.3	44.7	44.6	44.1	42.8	-

1) 1週間に上から2枚の花果房直下葉の葉幅を測定し、下位の花果房直下葉については、調査済みの葉幅データを活用し平均葉幅を算出
(以下同様)

2) 全ての花果房直下葉の葉幅を測定し、平均葉幅を算出

3) MAPE(平均絶対誤差率)= $100/7 \sum |各試験区 - 全花果房| / 全花果房$

4) データ欠損によりデータ略

調査個体によっては4週間の間に3枚の花果房直下葉が展開しており、4週間・2枚の条件では3枚目の葉幅データを利用することができず、地際からの花果房段数に対応する葉幅データが欠損したため、平均葉幅を算出することができなかった。

1週間・2枚、2週間・2枚、4週間・3枚で推定した平均葉幅は、全花果房で推定した平均葉幅と比較して、いずれも小さかった。これは、花果房直下の調査葉数が少ないほど、また調査間隔が長くなるほど、葉が完全に展開していない伸展途中の葉幅データを、調査済みの葉幅データとして使用することになるため、平均葉幅が小さく算出されたと考えられる。

全花果房と各調査方法との間で算出した平均絶対誤差率(Mean Absolute Percentage Error、以下MAPE)は、1週間・3枚、1週間・4枚、2週間・3枚、2週間・4枚、4週間・4枚において、それぞれ2.1%、1.0%、3.8%、1.3%、3.5%であった。

以上から、1週間・3枚、1週間・4枚、2週間・3枚、2週間・4枚、4週間・4枚における調査では、全花果房の平均葉幅をMAPE5%以内で推定することができた。

2 上位の花果房直下葉の葉幅の測定から算出したLAIの精度評価

葉面積を実測して算出したLAIと、各調査方法により平均葉幅から算出したLAIを表4に示す。葉面積を実測した場合のLAIと全花果房のLAIの差は、11月9日で0.07、1月18日で0.04、3月13日で0.16、5月1日で0.36であった。全花果房のLAIは、樋江井ら³⁾が開発した推定式に基づいて算出されたものであり、彼らが報告した平均誤差(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)と一致する結果となった。

実測LAIとの比較において、全花果房のMAPEは4.5%であった。一方、1週間・3枚、2週間・3枚におけるMAPEは、それぞれ4.9%、5.4%であり、1週間・4枚、2週間・4枚、4週間・4枚では、それぞれ3.4%、3.1%、3.1%となった。このことから、

表4 調査方法別 LAI

調査方法		推定 LAI				MAPE ⁴⁾ (%)
調査間隔	調査葉数	11月9日	1月18日	3月13日	5月1日	
1週間	3枚 ¹⁾	2.81	4.33	3.89	3.69	4.9
	4枚	2.93	4.47	4.05	3.74	3.4
2週間	3枚	2.77	4.19	3.78	3.50	5.4
	4枚	2.90	4.48	4.02	3.69	3.1
4週間	4枚	2.89	4.24	3.93	3.49	3.1
全花果房 ²⁾		2.93	4.54	4.14	3.79	4.5
葉面積実測 ³⁾		3.00	4.50	3.98	3.43	-

1) 1週間毎に上から3枚の花果房直下葉の葉幅を測定し、下位の花果房直下葉については調査済みの葉幅データを活用し、平均葉幅から LAI を算出 (n=9) (以下同様)

2) 全ての花果房直下葉の葉幅を測定し、平均葉幅から LAI を算出 (n=9)

3) 葉面積計を用いて株当たり葉面積を計測し、LAI を算出 (n=3)

4) MAPE (平均絶対誤差率)= $100/4 \sum |各試験区-葉面積実測| / 葉面積実測$

調査間隔が1週間、2週間、4週間のいずれの間隔においても、4枚の花果房直下葉を調査することにより、全花果房の調査と同程度の精度が得られた。

以上より、調査間隔が1週間、2週間、4週間のいずれの場合においても、上位4枚の花果房直下葉の葉幅を調査することで、LAIをMAPE5%以内で算出できることが明らかとなった。

全花果房は7~9枚の葉を測定するのに対し、本調査方法では4枚の葉を測定するため、調査葉数が約半分となることで調査が簡便になる。

さらに、調査間隔に関しては、LAIを算出する必要なタイミングに応じて、最大4週間までの間隔をあけることが可能である。本調査方法では調査間隔に関わらず、11月9日には花果房直下葉が4枚展開した時点(4週間前)からの葉幅データを使用し、1月18日、3月13日、5月1日には、最長で8週間前からの葉幅データを用いてLAIを算出した。このことから、LAIの推定にあたっては、算出予定日の最大8週間前から調査を開始する必要がある。

3 今後の課題

本研究におけるLAIのMAPEは、株当たりの着葉数に対する1~2枚程度の誤差に相当した。今後は、本調査方法を用いて栽培管理や収量予測を実施し、この程度の誤差が実際の管理や予測にどのような影響を及ぼすかを検討する必要がある。また、本研究では品種として「りんか[®]409」を用いたが、他の品種においても同様の調査方法でLAIを推定できるか検討が必要である。

民間企業等と共同開発した生育診断支援ツール「生育ナビ[®]」(株式会社ITAGE、名古屋)⁵⁾は、スマートフォンのカメラ機能を利用して取得したトマト植物体の画像をもとに計測を行うことで、葉幅等を測定することができる。樋江井ら⁶⁾によれば、このツールによる葉幅の画像計測では、下位葉において葉柄の下垂、小葉の湾曲、葉先の巻き込み、同一株及び隣接株との葉の重なりにより、測定誤差が生じやすいと報告している。本研究で明らかとなったLAIの推定方法は、測定対象を上位葉のみとしているため、ツールによる葉幅の画像計測においても、精度良くLAIを算出できる可能性があり、本ツールを利用することでさらなる省力化が期待できる。

本研究で得られたトマトLAIの簡易推定技術を生育診断や収量予測等に活用することで、「データ駆動型農業」の高度化と普及に寄与する可能性が高いと考える。

引用文献

- 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)
- 細井徳夫. 養液耕による施設栽培長段トマト個体群の収量に好適な葉面積指標に関する研究. 野菜・茶業試験場研究報告. 16, 329-349(2001)
- 樋江井清隆, 延命直紀, 伊藤緑, 犬飼瑠伽, 田中哲司, 大川浩司. 葉幅測定によるトマト葉面積指標推定技術の開発. 愛知農総試研報. 56, 46-57(2024)
- 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)
- 愛知県農業総合試験場. スマホで測って記録しよう!!“トマトの生育診断”. 愛知県農業総合試験場10大成果(2023) <https://www.pref.aichi.jp/uploaded/attachment/487103.pdf> (2025.9.1参照)
- 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)