

施設キュウリのハイワイヤー栽培における LAI 簡易推定

安 東赫・東出 忠桐・岩崎 泰永・河崎 靖・中野 明正

(平成 26 年 8 月 18 日受理)

Estimation of Leaf Area Index of Cucumbers (*Cucumis sativus* L.) Trained on a High-Wire

Dong-Hyuk Ahn, Tadahisa Higashide, Yasunaga Iwasaki,
Yasushi Kawasaki and Akimasa Nakano

I 緒 言

単位面積当たりの葉面積 (m^2m^{-2}) である葉面積指数 (以下 LAI) は、群落の光合成速度や吸光係数、光利用効率の算出や成長解析などに重要なパラメータであるため (Monsi ら, 1953; 東出ら, 2012), 簡単に葉面積を推定する方法に関する研究も多数存在する (Robbins ら, 1987; Gamiely ら, 1991; Panta ら, 1995; Montero ら, 2000). 物質生産を向上させるためには、適切な LAI を維持することが重要とされており、栽培管理でも LAI を指標とし、栽植密度の調整や整枝、摘葉などを行うことが多い。

LAI を推定するためには、株ごとの葉面積を把握する必要があるが、破壊調査をしなければ実測することは困難である。非破壊観察および栽培管理で除去する下葉の実測値のみで簡便に LAI を推定できれば、効率的な栽培管理が可能となる。キュウリの個葉面積は着生する葉位によって、また、生育ステージによって変動することから、個葉数枚のみのデータによって簡単に LAI を推定するためには、これらの変動を考慮した手法を開発する必要がある。

キュウリの整枝誘引法には、つる下ろし栽培 (加藤ら, 2005; 太田ら, 2005) や摘心栽培 (千葉県農業試験場, 1999; 田中ら, 1998; 埼玉県園芸試験場, 1997), ハイワイヤー栽培 (田中ら, 1997; Hao ら, 2010) など様々

なものがある。さらに、施設の形状や栽培方式によって誘引方法や栽植密度などが異なるため、栽培管理マニュアルを作成することは、非常に困難である。

つる下ろしおよびハイワイヤー栽培のように枝に生長点を含め、多数の葉が順に着生する誘引法の場合、キュウリの葉は、生長点から分化・展開し、徐々に大きくなるが、ある葉齢を過ぎると大きさの変化は少なくなる。そのため、生長点に近い第 1 葉の個葉面積が最も小さく、下の葉になるほど徐々に大きくなり、ある葉位からは同様な葉面積となる。本研究では、このような特性に着目し、キュウリのハイワイヤー栽培において個葉面積および葉重を測定した結果から簡易的な LAI 推定モデルを作成し検証を行った。

II 材料および方法

本研究では、野菜茶業研究所武豊野菜研究拠点 (愛知県武豊町) 内のユニット工法ハウス ($1,000\text{m}^2$, 軒高: 3.5m) で栽培を行った。キュウリの供試品種として、日本型品種には 'エテルノ' (ときわ研究所) および 'フレスコダッシュ' (久留米原種育成会) を、英国温室型品種には 'Proloog RZ' (ライクズワーン) を用いた。栽培時期による影響を調べるため、また、LAI の推定および検証のため、春作と秋作を行った。

春作は 2013 年 5 月 17 日に 72 穴セルトレイに播種

し、閉鎖系苗生産システム（苗テラス、三菱樹脂アグリドリーム(株)）を利用して昼温 27℃、夜温 24℃、日長 12 時間、CO₂ 濃度 900 ppm、培養液 EC0.8 dSm⁻¹（大塚 A 処方）の条件下で育苗後、5 月 31 日にロックウール養液栽培装置に定植した。ベッド間隔は 1.8 m で、ロックウールスラブ（900 × 150 × 75mm）あたり 5 株ずつ定植し、栽植密度が約 3.09 plant m⁻² になるようにした。定植後、培養液は大塚 A 処方を用い、掛け流し栽培を行った。培養液の EC は、定植時から生育初期までは 1.0 dSm⁻¹ で管理したが、成長に従い徐々に上昇させ、収穫開始以降は 1.5 dSm⁻¹ で管理した。株の主枝は摘みせず、すべての側枝を除去しながら 1 本仕立てのハイワイヤー誘引を行った。誘引の高さはベッドから 2.5m とし、上段に達すると約 30 cm ずつ下しを行った。つる下しの際、先端から 25 葉より下に着生した下葉は除去しながら栽培を行った。試験区は各品種 30 個体 × 2 反復の計 60 個体としたが、両端の 2 個体はボーダーとして調査対象から除外した。

秋作は 2012 年 9 月 6 日に播種し、苗テラスで 13 日間育苗後、9 月 19 日にロックウール養液栽培装置に定植した。秋作では、各品種 30 個体 × 3 反復の計 90 個体としたが、LAI が異なる材料を得るため、各品種の南側 45 株に対しては、誘引の高さを 1.6 m とし管理を行った。その他の育苗方法および栽培管理方法は春作と同様に行った。

図-1 には春作と秋作の栽培期間中の施設内気温および日射量を示した。いずれの作も栽培期間中、気温が 25℃以上になると換気扇が稼働し、天窗、側窓が開くように、15℃以下になると温風暖房機が稼働するように設定したが、春作では 30℃を超える日が多く、平均気

温は 22 ~ 31℃で推移した。秋作では後半は 15℃を下回る日が多く、平均気温は 17.6 ~ 27.4℃で推移した。施設内の日射量は秋作に比べて春作の方が高く推移し、定植後 48 日までの積算日射量は、春作が 560.1 MJm⁻² で、秋作は 446.8 MJm⁻² だった。室内の湿度および CO₂ 濃度は成り行きとした。栽培期間中は重量が 100g 前後に達した果実を収穫した。

春作での葉面積調査は、生育ステージが異なる 3 つの時期に行った。茎長が約 1.6m に達した定植後 20 日目、茎長が約 2.5m に達した定植後 28 日目および収穫期間が続いた定植後 69 日目に各試験区から標準的な株をランダムで選び、品種ごとに計 6 個体を採集し株に着生している各節のすべての葉を先端から順に分離し、一枚毎の個葉面積およびその生体重を測定した。葉長が 5 cm 以下の成長点付近の葉群をまとめて第 1 葉とし測定した。本実験では、第 1 葉を葉位 1 とし、下に行くほど、葉位が増えることとした。

秋作では収穫開始後 2 週間経った定植後 48 日目に各試験区から 6 個体を選び、品種ごとに 12 個体ずつ、計 36 株を調査した。葉面積測定には自動葉面積計（AAC-400、林電工）を用いた。

最大葉の個葉面積から LAI を推定するため、まず、各葉位の個葉面積（LAI_i, m²）を最大葉の個葉面積（LAI_m, m²）で割った値を相対葉面積比（以下 RLA, m²m⁻²）とした（式 1）。

$$RLA = LAI_i \div LAI_m \quad \text{式 1}$$

春作の 3 品種、6 株、3 時期の計 54 株から得られた葉のそれぞれの葉位 (n) と RLA データを用い、葉位を横軸とし、RLA を縦軸とした近似式 (F) を求めた。株に

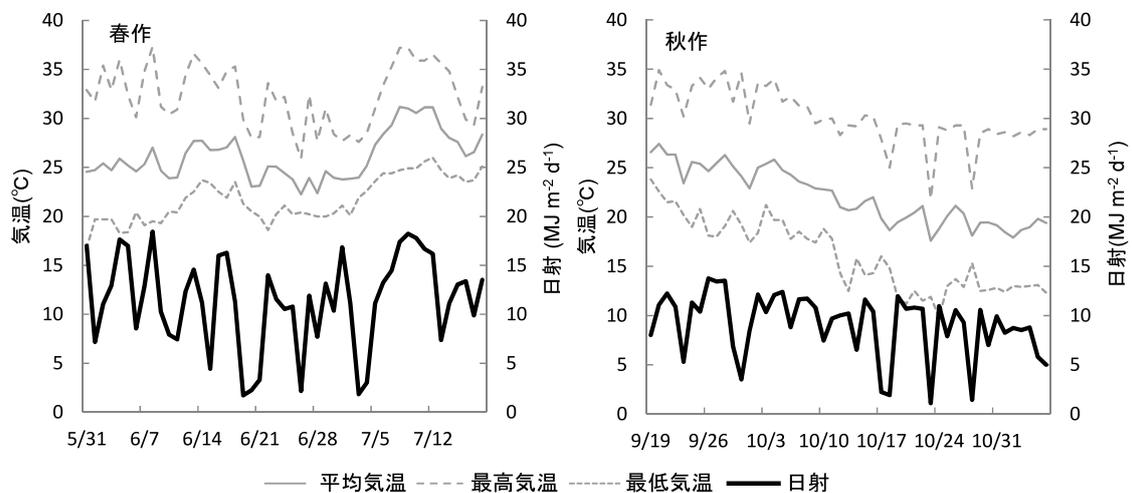


図-1 栽培期間中の施設内の気温および日射量

着生している葉位までの近似式の積分値と株ごとの最大葉の葉面積を用い、株当たりの葉面積 (LA, $m^2 plant^{-1}$) を算出した (式 2)。

$$LA = \int_0^n F(n) dn \times LA_m \quad \text{式 2}$$

LAI ($m^2 m^{-2}$) は株当たり葉面積と実験に用いた栽植密度 (PD, $plant m^{-2}$) から算出した (式 3)。

$$LAI = LA \times PD \quad \text{式 3}$$

LAI の推定値を検証するために秋作の 3 品種、6 株、2 誘引方法の計 36 株から得られた葉位および個葉面積のデータを用い、算出した LAI 推定値と実測値との比較を行った。

III 結果

1 個葉面積と葉の生体重との関係

図-2 に春作の 3 品種における個葉の葉面積と生体

重との関係を示した。いずれの品種においても個葉面積と葉の生体重とは相関関係が高かった。また、生育ステージが異なる定植後 20 日、28 日、69 日目のキュウリの葉においても同様な傾向だった。

2 栽培時期による個葉面積の変動

図-3 には葉位ごとの個葉面積における栽培時期の影響について調べるため、春作は定植後 28 日目の株を、秋作は定植後 48 日目の株を用いて、それぞれの葉位ごとの個葉面積の推移を示した。生長点から近い順に葉位を横軸とし、個葉面積を縦軸に示すと、実験に用いた 3 品種いずれも第 1 葉～10 葉では葉位が増加するほど、葉面積は著しく大きくなったが、第 10 葉以降の葉は同様な葉面積であった。春作と秋作の株は栽培時期は異なったものの、葉位ごとの個葉面積には大きな差はなかった。

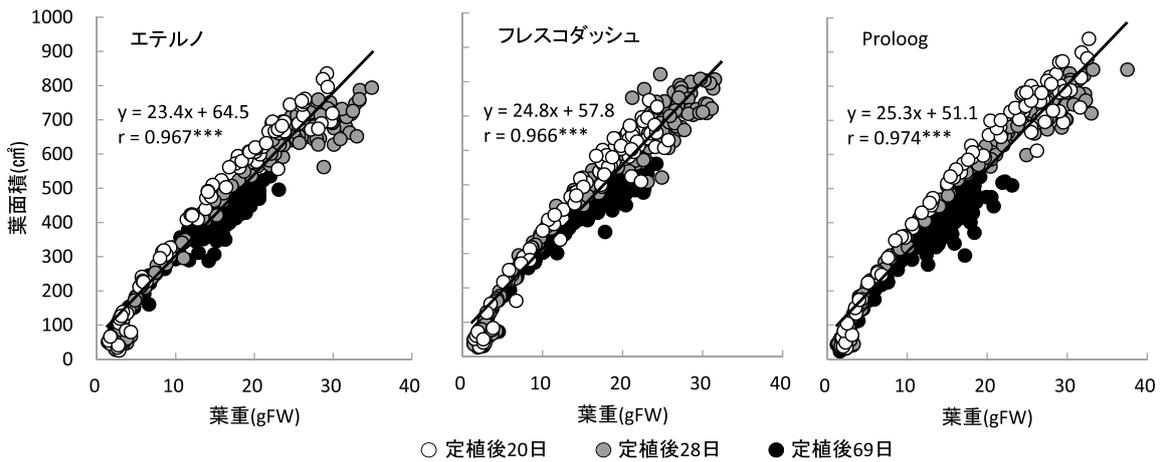


図-2 キュウリの個葉の生体重と葉面積との関係
図中の *** は 0.1% 水準で有意

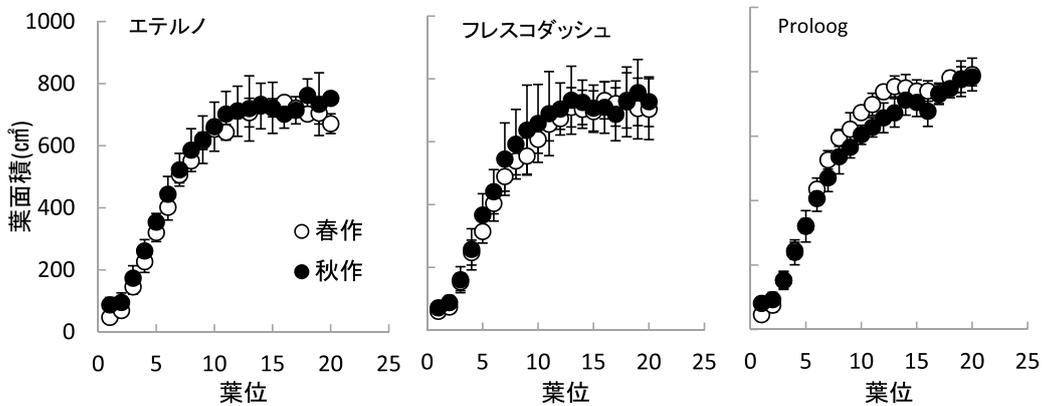


図-3 春作と秋作におけるキュウリの葉位ごとの葉面積
図中のエラーバーは標準誤差 (n=6)
春作は定植後 28 日目の株を秋作は定植後 48 日目の株を使用

3 生育ステージによる個葉面積およびRLA

春作の定植後20日, 28日, 69日目の株に対し葉位ごとの個葉面積を比較すると, 生育ステージによって個葉面積の大きさは異なった(図-4). 定植後20日と28日の株では第10葉以上の個葉面積が700 cm²より大きいことに対し, 定植後69日目の株ではほとんどの個葉面積は500 cm²より小さかった.

しかし, 葉位ごとの個葉面積と最大葉の個葉面積との対比であるRLAを縦軸に示すと(図-5), 第10葉以降の葉でも, 相対葉面積比は0.8~1.0で推移し, 定植後20, 28, 69日目の株の間には個葉面積で見られた大きな差はなかった.

4 葉位と相対葉面積比との関係

図-6には葉位とRLAとの関係式を調べるために春作の3品種, 6株, 3時期の計54株のデータを基に葉位

(n)とRLAとの散布図を作成し, 近似式を求めた結果, 式4であった.

$$RLA = \frac{0.896}{1 + (14.811 \times e^{-0.51 \times n})} \quad \text{式4}$$

5 推定値の検証

秋作の株において, 最大葉の個葉面積と着生している葉位までのRLAの近似式(式4)における積分値および栽植密度を基に, 式2, 式3を用いてLAIの推定値を算出し, 実測値との関係を調べた結果(図-7A), LAIが1.5~4.5の範囲では高い正の相関が認められた($r = 0.980$).

図-7Bには, 秋作の最大葉の生体重を図-2に示した個葉の葉面積と生体重との回帰式から個葉面積を求め, 図-7Aと同様に算出したLAIの推定値と実測値との関係を示した. その結果, 最大葉の生体重から算出した

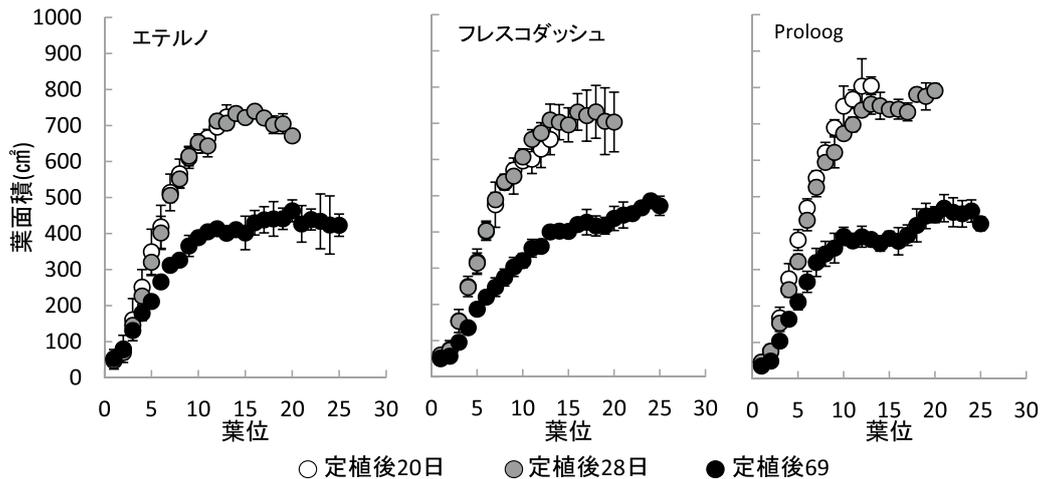


図-4 各品種の定植後20, 28, 69日目のキュウリの葉位ごとの葉面積
図中のエラーバーは標準誤差 (n=6)

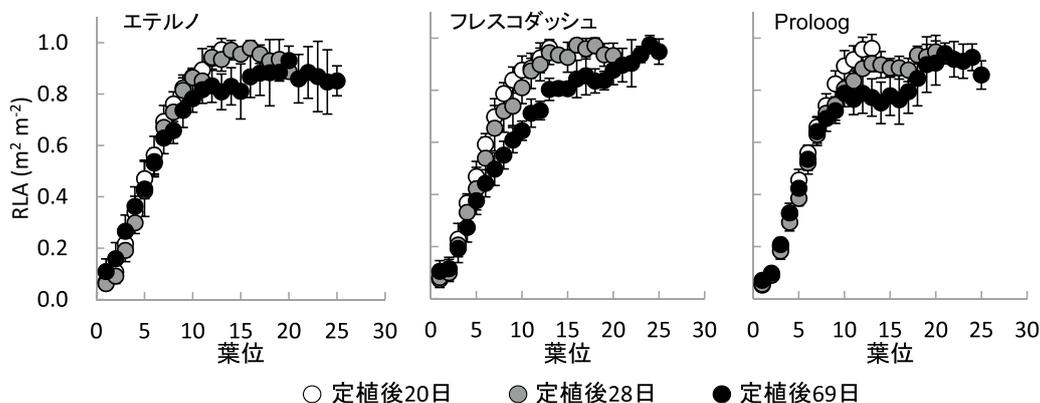


図-5 異なる生育ステージにおけるキュウリの葉位ごとのRLA
図中のエラーバーは標準誤差 (n=6)

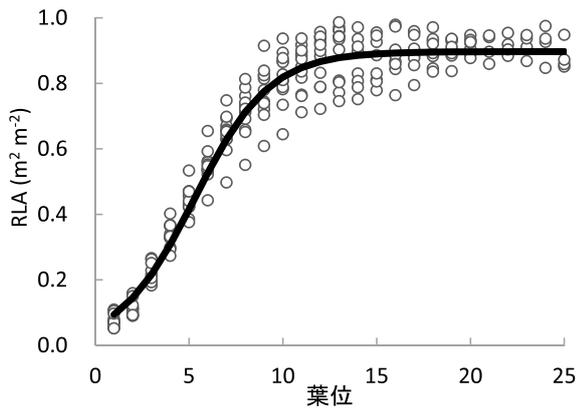


図-6 キュウリの葉位と RLA との関係
図中の 1 プロットは葉 6 枚の平均値

LAI の推定値は、最大葉の葉面積から求められた推定値よりは低かったものの、同様に高い正の相関が認められた ($r = 0.928$)。

IV 考 察

本研究では主枝に着生する個葉面積の大きさの違いを利用し簡易的な LAI 推定モデルを作成した。

栽培時期による影響を調べるために行った春作と秋作のキュウリ栽培では、各生育ステージにおける気温および日射量ともに異なったにも関わらず、葉位ごとの個葉面積には大きな差はみられなかった。すなわち、本実験で作成したモデルは、栽培時期による影響は小さいこと

を示唆している。

一方で収穫期の前半と後半で葉位ごとの個葉面積に大きな差があったが、これはキュウリ株に着果負荷が長く続くことによって、光合成産物の葉への分配比率が減少し、個葉面積が小さくなったためと考えられる (穴戸ら, 1990)。そのため、ある特定の個葉面積の推定による、栽培期間を通した LAI の推定は困難であると考えられる。しかし、葉位ごとの RLA は、生育ステージによる差が小さかったことから、着果負担によって全体の個葉面積は変動しても最大葉の葉面積に対する個葉面積の比率は同様であることが示唆され、RLA によるモデル化が有効であると考えられる。

本実験で用いた 3 品種、2 作のデータでは、栽培ステージや栽培時期、品種に関わらず、第 10 葉目以降の個葉面積の差は大きくなかった。すなわち、第 10 葉より下に着生する葉の個葉面積は、最大葉面積とみなしてもよいものと考えられた。つる下し栽培やハイワイヤー栽培では、下葉を定期的に除去しながら栽培を行うが、それらの葉は最大葉と同様な個葉面積であると考えられるため、この下葉の個葉面積と株の節数を把握できれば、施設内の全体の LAI が推定できると考えられる。

キュウリの栽培において、途中で栽培環境が大きく変動すると、個葉面積や葉重など、草勢の変化が起きると考えられる。例えば、ある特定の時期から養水分条件が大きく変われば、その後に展開する葉の形状や重量が変化し、本報で示した最大葉に対する葉位ごとの RLA の近似式とは異なることが予想される。本実験では、養液

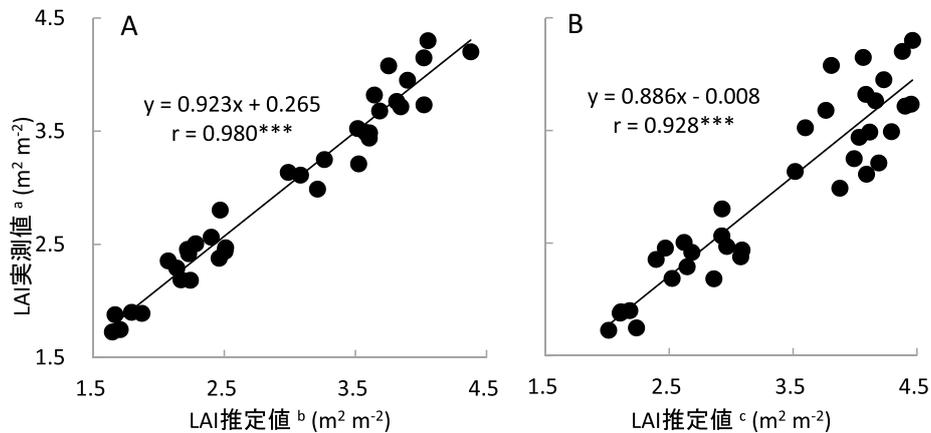


図-7 キュウリの LAI 推定値と実測値との比較 (n=36)

図中の 1 プロットは 1 株の推定値と実測値

図中の *** は 0.1% 水準で有意

a 1 株当たり総葉面積の実測値を用いて算出した LAI

b 最大葉の葉面積から推定した LAI

c 最大葉の生体重から推定した LAI

栽培を用い、栽培期間中の養水分条件の変動が少なく、ストレスを受けづらい環境を維持したと考えられる。すなわち、栽培期間中に安定した養水分条件下で成長した株であれば、本モデルの適応が可能であると判断した。

また、最大葉面積を利用した推定値および最大葉の生体重を利用した推定値、いずれも実測値との有意な相関が認められたことから、最大葉とみられる下葉の生体重を測定することによってさらに簡便に LAI が予測できると判断した。

Choら(2007)やBlancoら(2003,2005),Robbins・Pharr(1987)などの研究では、葉長と葉幅の長さを用いて個葉面積の推定モデルを示しており、これらのモデルと本研究の推定法と合わせて使えば、キュウリにおいても非破壊的な方法で精度の高い LAI の推定が可能になると考えられる。

V 摘 要

キュウリの株は生長点に近い葉の個葉面積が最も小さく、下位の葉になるほど徐々に大きくなり、ある葉位からは同様な葉面積となる。このような特性に着目し、キュウリのハイワイヤー栽培において簡易的な LAI 推定法を作成し検証を行った。

個葉の葉面積と生体重の間には高い相関関係があり、葉の生体重から葉面積を推定することができた。葉位ごとの個葉面積の推移傾向には生育ステージによる大きな差はなかったが、収穫期後半になると、個葉面積が小さくなる傾向があった。

キュウリの葉位 (n) と相対葉面積比 (RLA) との間には、以下の近似式のような関係があった。

$$RLA = \frac{0.896}{1 + (14.811 \times e^{-0.51 \times n})}$$

RLA の近似式、最大葉の個葉面積および着生する葉数をもとに求められた LAI の推定値と実測値との間には高い正の相関関係が認められた。また、最大葉の生体重から計算した葉面積を用いた場合にも、推定値と実測値との間には同様に高い正の相関関係が認められた。

キュウリのハイワイヤー栽培においては、定期的に除去する下葉の個葉面積あるいは生体重と、着生本葉数を把握することにより、LAI を簡便に推定できるものと考えられた。

引用文献

- 1) Blanco, F. F. and M. V. Folegatti (2003): A new method for estimating the leaf area index of cucumber and tomato plants. *Hortic. Bras.*, 21(4), 666-669
- 2) Blanco, F. F. and M. V. Folegatti(2005): Estimation of leaf area for greenhouse cucumber by linear measurements under salinity and grafting. *Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.)*, 62(4), 305-309.
- 3) Cho, Y., Oh, S., Oh, M. and J. Son (2007): Estimation of individual leaf area, fresh weight, and dry weight of hydroponically grown cucumbers (*Cucumis sativus* L.) using leaf length, width, and SPAD value. *Sci. Hort.*, 111, 330-334.
- 4) Gamiely, S., W.M.Randle, H.A.Mills and D. A. Smittle (1991): A rapid and nondestructive method for estimating leaf area of onions. *HortSci.*, 26(2), 206.
- 5) Hao, X., G.Wen, P. P. Athanasios and S. Khosla (2010): A twin-head "V" high-wire greenhouse cucumber production system for reducing crop start-up costs. *Horttech.*, 20(6), 963-970.
- 6) 東出忠桐・後藤一郎・鈴木克己・安場健一郎・塚澤和憲・安東赫・岩崎泰永 (2012): 収量構成要素の解析からみたキュウリ短期栽培の摘心およびつる下ろし整枝法の差異. 園学研., 11 (4), 523-529.
- 7) 加藤香織・高橋登 (2005): キュウリつる下ろし栽培における整枝法. 群馬農技セ研報., 2, 121-129.
- 8) Monsi, M. and T. Saeki (1953): Über den lichtfaktor in den pflanzengesellschaften und seine bedeutung für die stoffproduktion. *Jpn. J. Bot.*, 14 : 22-52.
- 9) Montero, F.J., de Juan, J.A., Cuesta, A. and A. Brasa (2000): Nondestructive methods to estimate leaf area in *Vitis vinifera* L. *HortScience.*, 35 (4), 696-698.
- 10) 太田友代・清野英樹・井上直和 (2005): 施設キュウリの新整枝法「つる下ろし栽培」の特徴と生産安定技術. 埼玉農総セ研報., 4, 79-83.
- 11) Panta G. R. and D. S. NeSmith (1995) : A model for estimating area of muskmelon leaves. *Hortsci.*, 30(3), 624-625.
- 12) Robbins, N.S. and D.M. Pharr (1987) : Leaf area prediction methods for cucumber from linear measurements. *HortScience*, 22 (6), 1264-1266.
- 13) 埼玉県園芸試験場. 1997. キュウリの施設栽培における短期採りに適した品種特性. 農研センター成果情報. (<http://agriknowledge.affrc.go.jp/RN/3010005722>).
- 14) 穴戸良洋・堀裕・鹿野昭一 (1990) : キュウリ果実の着果・肥大期における光合成産物の転流・分配に及ぼすベンジル・アデニンの影響. 園学雑., 59(1), 129-136.
- 15) 田中昭夫・小口裕 (1998) : 温暖地中産間地域における夏秋キュウリの短期どり2期作体系. 平成9年度近畿中国農業研究成果情報, 215-216.
- 16) 田中和夫・山崎篤・中島規子・池田英二 (1997): 省力化のためのハイワイヤー整枝法がキュウリの生育・収量に及ぼす影響. 園芸学会雑誌, 別冊, 66(1), 376-377.
- 17) 千葉県農業試験場 (1999) : キュウリ2作型の組み合わせによる収量, 品質, 所得の向上. 平成10年度関東東海農業研究成果情報, 522-523.

Estimation of Leaf Area Index of Cucumbers (*Cucumis sativus* L.) Trained on a High-Wire

Dong-Hyuk Ahn, Tadahisa Higashide, Yasunaga Iwasaki,
Yasushi Kawasaki and Akimasa Nakano

Summary

The area of a cucumber leaf is smallest near the growing point and gradually increases basipetally to a maximum value. On this basis, we created a model for easy estimation of leaf area index (LAI) of cucumber trained on a high-wire from the values of individual leaf area, fresh weight, and number of leaves. Individual leaf area was highly correlated with individual leaf fresh weight. There was a difference in individual leaf area at each leaf position between 28 and 69 days after transplanting, but not in RLA (relative leaf area ratio, which represents the individual leaf area divided by the maximum leaf area) at each leaf position. RLA could be estimated from leaf position (n) as

$$RLA = \frac{0.896}{1 + (14.811 \times e^{-0.51 \times n})}$$

There was a significant correlation ($r = 0.980$, $P < 0.001$) between measured LAI and LAI estimated from integration value of RLA, number of leaves, and individual leaf area of maximum leaf. There was also a significant correlation ($r = 0.928$, $P < 0.001$) between measured LAI and LAI estimated from integration value of RLA, number of leaves, and individual leaf fresh weight of maximum leaf.

We conclude that LAI of cucumber can be estimated from the number of leaves attached to the stem and either the individual leaf area or the fresh weight of the old leaf pruned regularly.