

葉面積指数(LAI)を用いたユズのせん定の定量化

谷本 佑*・廣瀬拓也**・西森 空・中野和彦***・北沢知明****

Quantifying the Pruning of Yuzu (*Citrus junos* Sieb. ex Tanaka)
using Leaf Area Index

Yuu TANIMOTO*, Takuya HIROSE**, Sora NISHIMORI, Kazuhiko NAKANO*** and Tomoaki KITAZAWA****

要 約

ユズにおけるせん定の定量化の指標として葉面積指数(以下, LAI)に着目し, LAI を非破壊かつ迅速に推定するためのプラントキャノピーアナライザー(以下, PCA)の測定方法を明らかにした. さらに, 隔年結果性および収量性の観点から, 適正なせん定量を指標化した.

1. PCA を用いて測定した LAI (以下, PCA-LAI) は, 主幹中心から距離 80cm の 4 方位(東西南北)の位置より 90° のビューキャップを装着して測定し, 天頂角 4 つ(7, 23, 38, 53°)で解析した時に, 最も実際の LAI (以下, 実測 LAI) に近似した.
2. 県内生産者園地の実態調査から, 樹容積あたりの収量が 2.1kg/m³ 以上の高い収量(高収量性)かつ隔年結果指数が 0.30 未満の毎年安定した収量(低隔年結果性)が得られている園地を抽出した. この高収量性かつ低隔年結果性の園地のせん定後 LAI は 3.7, LAI 減少量は 1.7, LAI 減少率は 30.6%で, これらがせん定量の目安となると考えられた.

キーワード: 隔年結果性, プラントキャノピーアナライザー, せん定量, 天頂角

はじめに

高知県内のユズ(*Citrus junos* Sieb. ex Tanaka)産地では, 生産者の高齢化が進むなか, 新規参入, 親元就農および定年帰農等の多様な新規就農者の受入体制が整備されている. しかし, ユズは隔年結果性が強く, せん定に代表される栽培管理に熟練を要し, これらが新規就農を阻害する要因となっている.

カンキツ類のせん定について, せん定の方法に着目した研究^{2,4,5}や資料³は多いものの, せん定量に着目した研究は少なく⁹, ユズにおいてもせん定量を客観的に示す方法およびその目安は明らかとなっていない. またユズでは, 加工用果実が他のカンキツ類と比較して高単価で取引されるため, 摘果はほとんど行われず, 熟練生産者はせん定量を調節することで着果量をコントロールしている. 着果量の変動は収入の不安定化につながるため, 隔年結果抑制の観点からも, せん定量の定量化は極めて重要である.

そこで本報告では, せん定の定量化の指標として LAI に着目した. せん定量の指標としてせん定葉枝重を用いる場合もあるが⁹, せん定後の樹体の葉枝重は, 解体して調査しなければ

ならない. LAI は非破壊での調査が可能である. しかし, 実測 LAI の算出には, 多大な時間と労力が必要なため, LAI を迅速に推定するための PCA の測定方法を検討した. さらに, 隔年結果性および収量性の観点から, ユズにおける適正なせん定量を指標化したので報告する.

なお本研究は, 内閣府地方大学・地域産業創生交付金「“IoP(Internet of Plants)”が導く「Next 次世代型施設園芸農業」への進化」の助成を受けて実施した. また, 実施に当たっては, 安芸市および香美市の現地生産者, 高知県農業協同組合, 安芸農業振興センター, 中央東農業振興センターおよび果樹試験場の職員から多大な協力を賜った. ここに記して深く感謝の意を表する.

材料および方法

1. 着果樹を用いた PCA によるユズの LAI 測定方法の検討

まず最初に, PCA によるユズの LAI 測定に最適な測定位置お

* 農業技術センター果樹試験場兼高知工科大学

** 現農業大学校

*** 現中央西農業振興センター

**** 現中央西農業振興センター高知農業改良普及所

よびPCA-LAI算出に用いる天頂角数について、着果樹を用い検討した。果樹試験場内露地ほ場(高知市朝倉, 以下, 場内)に植栽間隔3.0×4.0mで植えられた20~24年生の開心自然形のユズ「公文系」10樹を供試し, 2019年8月下旬~9月に全葉数, 個葉面積および樹幅(長径幅, 短径幅)を測定した後, 実測LAI=全葉面積/(全葉数×個葉面積)/樹冠占有面積(=(長径幅+短径幅)/2/2)²×π)を算出した。なお個葉面積は, 樹内で中庸な葉を20枚/樹ずつ採取し, スキャナーでスキャンして, フリーソフトウェアのLIA for Win32を用いて算出した。PCA-LAIは, 曇

天日の9月30日日中に90°のビューキャップを装着したPCA(LAI-2200C, LI-COR社製)を用い, 山本ら¹⁰⁾の方法を参考に, 主幹中心から30, 40, 50, 60, 70, 80, 90cm離れた4方位(東西南北)の位置より測定した。付属の解析ソフト(FV2200, LI-COR社製)を用い, 天頂角5つ(7, 23, 38, 53, 68°, 以下, 5天頂角), 天頂角4つ(7, 23, 38, 53°, 以下, 4天頂角)および天頂角3つ(7, 23, 38°, 以下, 3天頂角)により, 光路長をHorizontal(default)として解析した(図1)。

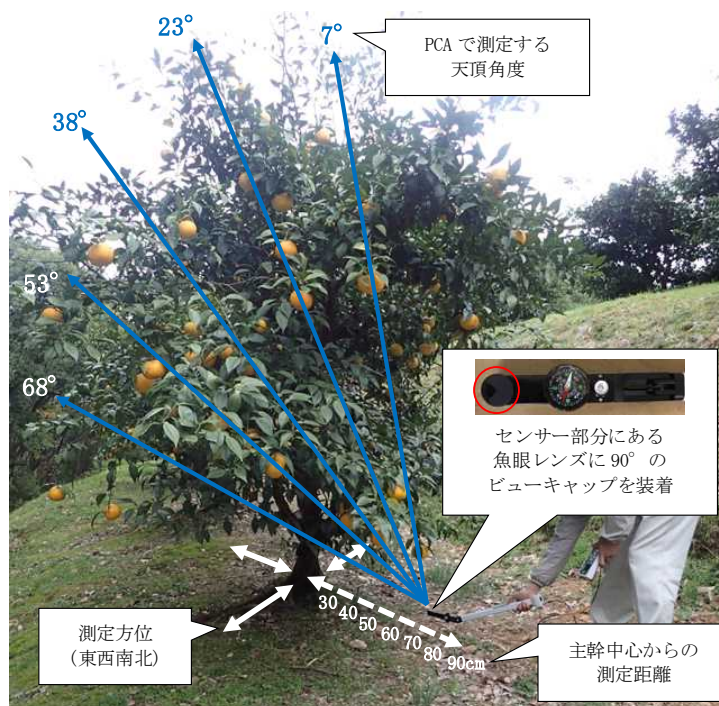


図1 PCAによる測定の様子

2. 未着果樹を用いたPCAによるユズのLAI測定方法の検証

次に, 着果樹を用い検討したPCA-LAIの測定方法について, 未着果樹を用いて検証した。場内に植栽間隔3.0×4.0mで植えられた19~26年生の開心自然形のユズ「公文系」11樹, 計20データを用いた。実測LAIは, 2019年2月下旬(せん定前), 3月中旬(せん定後)および2022年2月下旬(せん定前), 3月下旬(せん定後)に, 試験1と同様の方法で算出した。PCA-LAIは, 90°のビューキャップを装着したPCAを用い主幹中心から80cm離れた4方位の位置より, 曇天日の2019年2月27日(せん定前), 3月25日(せん定後), 2022年2月9日(せん定前)および3月25日(せん定後)の日中に測定した。試験1と同様に付属の解析ソフトを用い, 5天頂角, 4天頂角および3天頂角で解析した。

3. PCA-LAIによるユズのせん定量の指標化

最後に, 県内生産者園地の実態調査から生産性の高い園地

を抽出し, 収量とPCA-LAI等との関係を解析して, 適正なせん定量を検討した。安芸市および香美市の平坦地に植栽されている計8園地(表1)から, 平均的な樹を4樹ずつ選び調査対象とした。施肥や防除等は生産者慣行とし, 全園とも完全着色後に収穫した。樹冠占有面積および樹容積は, 2018年11月, 2019年11月, 2021年1月および2022年1月に箱尺で樹幅(長径幅, 短径幅)および高さを測定し, 楕円および半楕円体に近似として算出した。収量は, 2018~2021年の11月に収穫重量を調査した。本研究では, 旧高知県山間農業試験場の調査結果(表2)から, 開心自然形における樹容積あたりの基準収量を2.1kg/m³とし, 2.1kg/m³以上を高収量性園地, 2.1kg/m³未満を低収量性園地とした。隔年結果指数はHoblynら¹⁾の計算式(|当年収量-前年収量|/(当年収量+前年収量))より算出した。安定生産上許容できる値を0.30と設定し, 0.30未満を低隔年結果性園地, 0.30以上を高隔年結果性園地とした。収量性および隔年結果性の組み合わせにより調査園地を4つに分類し, 高収量性かつ

低隔年結果性と分類された園地のPCA-LAIを推定した。PCA-LAIは、2018年11月、2019年3～4月、11月、2020年4月、2021年1月および3～4月の曇天日中に、主幹中心から80cm離れた4方位の位置で測定し、4天頂角から算出した。2018年11月、2019年11月および2021年1月に測定したPCA-LAIをせ

ん定前LAI、2019年3～4月、2020年4月および2021年3～4月に測定したPCA-LAIをせん定後LAI、せん定前LAI－せん定後LAIをLAI減少量、LAI減少量/せん定前LAI×100をLAI減少率(%)とした。

表1 調査ほ場の概要

園地	品種、系統	樹齢(年) ^{z)}	植栽間隔(m)	樹形	樹高(m) ^{y)}	樹容積(m ³) ^{x)}	10aあたりの樹冠占有面積率(%) ^{w)}
安芸A	海川	14	4.0 × 4.0	開心自然形	2.4	16.7	64.1
安芸B	海川	14	4.0 × 2.5	開心自然形	3.2	20.8	97.8
安芸C	海川	14	4.0 × 3.0	開心自然形	3.1	18.2	72.6
安芸D	海川	15	3.5 × 3.0	開心自然形	3.1	18.4	83.7
香美A	公文2号	不明	3.5 × 3.0	開心形	2.6	11.3	61.5
香美B	公文	24	3.0 × 3.5	開心形	2.2	9.7	62.9
香美C	公文	26	4.0 × 3.5	開心形	2.5	13.2	56.8
香美D	公文	10	3.0 × 2.7	開心形	2.3	8.3	68.1

z) 2018年時点の樹齢。

y) 2018～2021年の各年11月の平均値。

x) 半楕円体=π×長径幅/2×短径幅/2×樹高×4/3/2に近似として算出。2018～2021年の各年11月の平均値。

w) 楕円=π×長径幅/2×短径幅/2に近似とした1樹あたりの樹冠占有面積と、植栽間隔から算出した10aあたり植栽本数より算出。

表2 ユズの基準収量の算出方法

調査年	樹齢	1樹当たり収量		平均果実重(g)	樹冠m ³ 当たり個数	樹容積(m ³)	収量(kg/m ³)
		個数	重量(kg)				
1978	8	165.8	21.4	132.0	14.9	11.1	2.0
1979	9	360.0	37.6	109.0	22.1	16.3	2.4
1980	10	199.1	20.1	121.0	14.5	13.7	1.8
1981	11	381.0	37.8	104.0	22.3	17.1	2.3
平均		276.5	29.2	116.5	18.5	14.6	2.1

注1) 昭和56年度高知県山間農業試験場試験研究実績報告書より抜粋。

注2) 物部村、8年生、開心自然形、階段畑で段幅が2.3～3.9m、株間が3.4～5mの1列植、13本を調査。

結 果

1. 着果樹を用いたPCAによるユズのLAI測定方法の検討

着果樹におけるPCA-LAIは、いずれの距離の測定でも、5天頂角での算出時に実測LAIより低くなり、4天頂角の算出では同等で、3天頂角の算出では高くなる傾向であった。また、4天頂角での算出時の主幹中心からの距離は、80cmとした場合に相関係数0.82と最も強い正の相関がみられた。無相関の検定において有意差が認められたいずれの回帰式においても、切片は-1.35～-4.19とマイナスであった(図2)。

2. 未着果樹を用いたPCAによるユズのLAI測定方法の検証

せん定によりLAIを変化させた未着果樹においてPCA-LAIと実測LAIの関係を調査したところ、決定係数は天頂角数による差がみられなかった。一方、回帰直線の傾きは、5天頂角での算出時に1.22とPCA-LAIが実測LAIより過小評価され、3天頂角での算出時に0.64とPCA-LAIが実測LAIより過大評価さ

れる傾向だったのに対し、4天頂角での算出では0.88、切片は+0.21とPCA-LAIの値が最も実測LAIに近かった(図3、表3)。

3. PCA-LAIによるユズのせん定量の指標化

樹容積あたりの収量(kg/m³)は、安芸A、C、D園および香美B、C園が基準収量より多かった(図4)。隔年結果指数は、安芸C園および香美A、B、C園が0.30未満と小さかった(図5)。せん定後LAIは、安芸A園および香美A園でそれぞれ2.7および3.1と低く、安芸D園で4.5と高かった(図6)。LAI減少量は、安芸C、D園および香美B、D園で2.0以下と小さかった(図7)。LAI減少率(%)は、香美B園および安芸D園でそれぞれ24.7%および23.5%と低く、安芸A園では49.2%と高かった(図8)。高収量性かつ低隔年結果性と分類された安芸C園および香美B、C園におけるせん定後LAIの平均値は3.7(図6)、LAI減少量の平均値は1.7(図7)、LAI減少率(%)の平均値は30.6%であった(図8)。

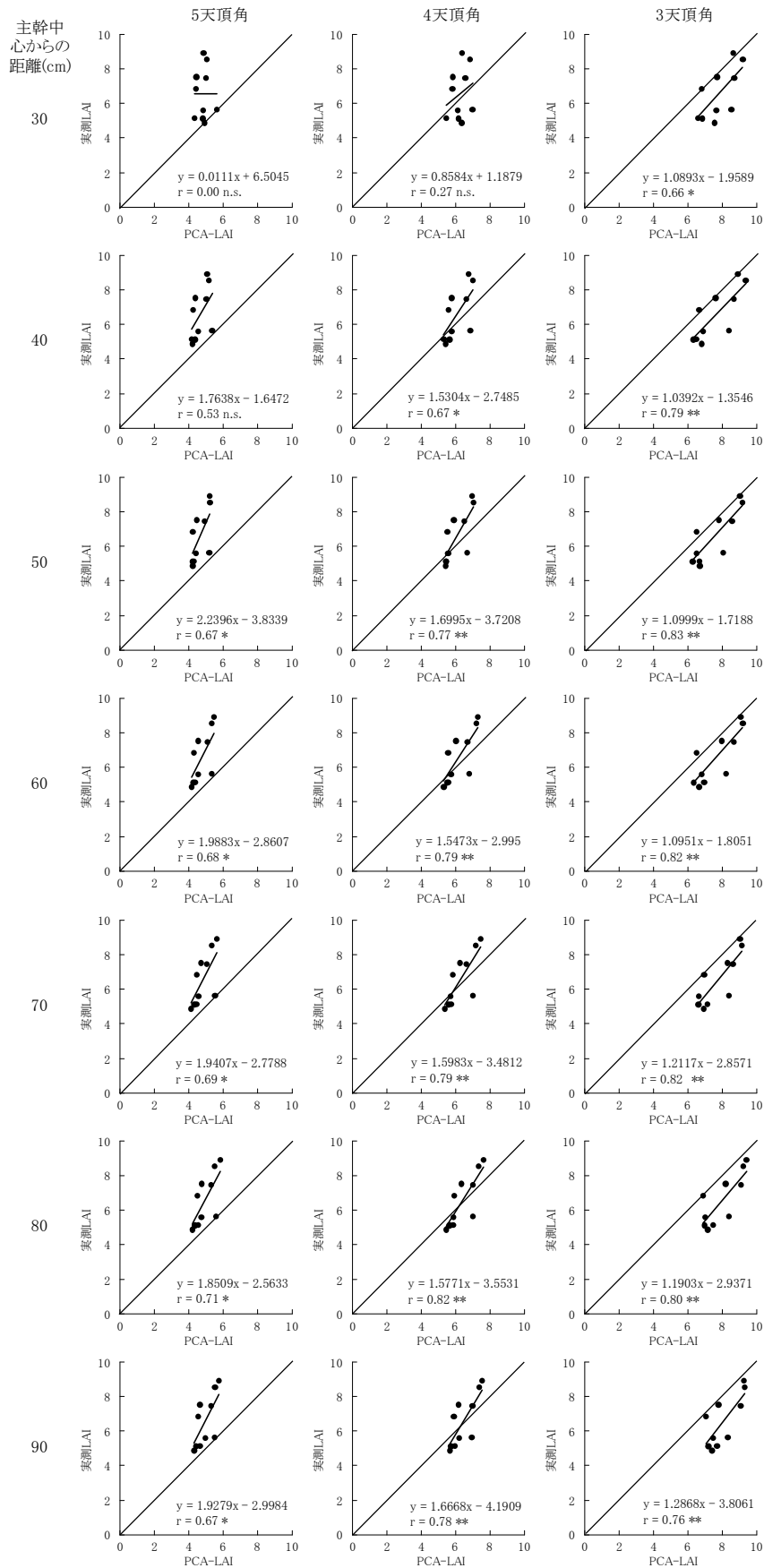


図2 着果したユズ樹体における PCA-LAI と実測 LAI の関係

注) 無相関の検定により, **は1%水準で, *は5%水準で有意差あり, n. s. は有意差なし。

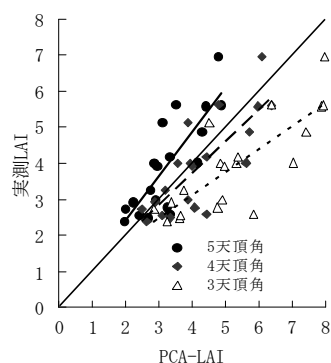


図3 未着果のユズ樹体における PCA-LAI
と実測 LAI の関係

表3 未着果のユズ樹体における PCA-LAI と実測 LAI の関係

天頂角数	回帰式	相関係数 ^{z)}	決定係数
5天頂角	$y=1.2215x-0.0264$	0.80 **	0.65
4天頂角	$y=0.8801x+0.2073$	0.79 **	0.63
3天頂角	$y=0.6376x+0.5544$	0.80 **	0.65

z) 無相関の検定により, **は1%水準で有意差あり.

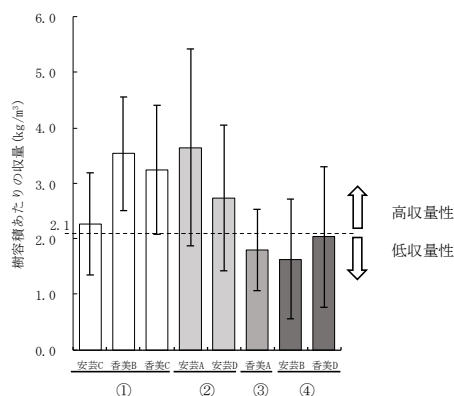


図4 現地生産者ほ場の収量性

注1) 各園4樹調査, 2018~2021年の
平均値.

注2) エラーバーは標準偏差を示す.

注3) ①は高収量性×低隔年結果性園,
②は高収量性×高隔年結果性園, ③は低
収量性×低隔年結果性園, ④は低収量性
×高隔年結果性園を示す.

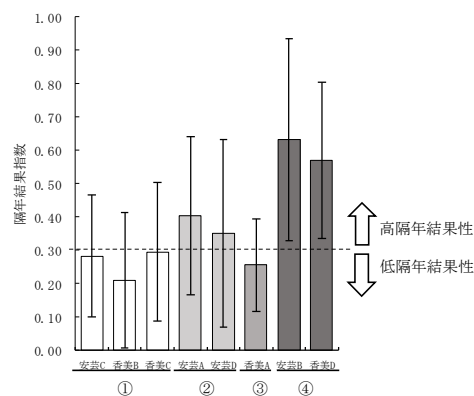


図5 現地生産者ほ場の隔年結果性

注1) 各園4樹調査, 2018~2021年の
平均値.

注2) エラーバーは標準偏差を示す.

注3) ①は高収量性×低隔年結果性園,
②は高収量性×高隔年結果性園, ③は低
収量性×低隔年結果性園, ④は低収量性
×高隔年結果性園を示す.

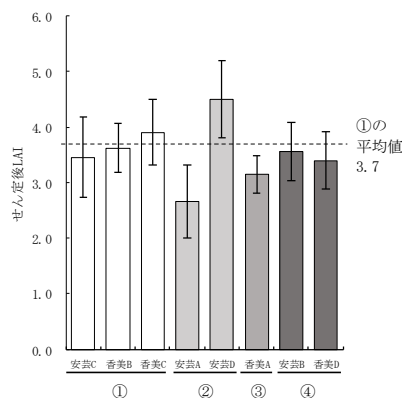


図6 現地生産者ほ場のせん定後 LAI

注1) 各園4樹を PCA により調査,
2019~2021年の平均値.

注2) エラーバーは標準偏差を示す.

注3) ①は高収量性×低隔年結果性園,
②は高収量性×高隔年結果性園, ③は低
収量性×低隔年結果性園, ④は低収量性
×高隔年結果性園を示す.

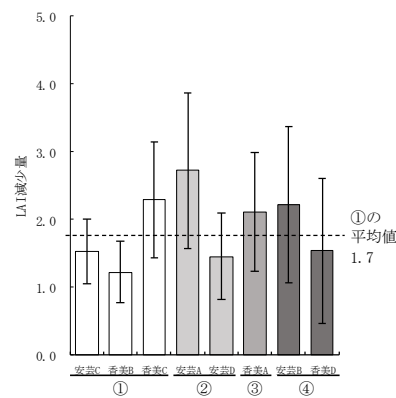


図7 現地生産者ほ場の LAI 減少量

注1) 各園4樹を PCA により調査,
2019~2021年の平均値.

注2) エラーバーは標準偏差を示す.

注3) ①は高収量性×低隔年結果性園,
②は高収量性×高隔年結果性園, ③は低
収量性×低隔年結果性園, ④は低収量性
×高隔年結果性園を示す.

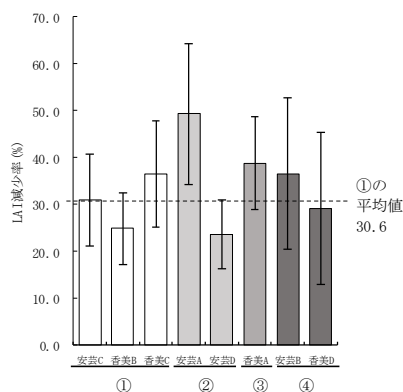


図8 現地生産者ほ場のLAI減少率

注1) 各園4樹をPCAにより調査、

2019～2021年の平均値。

注2) エラーバーは標準偏差を示す。

注3) ①は高収量性×低隔年結果性園、
②は高収量性×高隔年結果性園、③は低
収量性×低隔年結果性園、④は低収量性
×高隔年結果性園を示す。

考 察

ユズの新規就農者にとって、せん定は習得の難しい管理作業の一つである。特にせん定量は、前年の着果量や収穫時期、結果母枝の量や質、葉色、落葉量および幹腐病の罹患の有無等によって樹毎に決定する必要がある。せん定量が少ないと、枝葉が混み合いすぎて防除や収穫作業等に時間を要する³⁾。一方、せん定量が多すぎる場合、樹形が乱れ、収量および品質が不安定となる²⁾。熟練生産者は前述の樹の状態を基に経験的に判断しせん定量を調節しているが、ユズにおいて適正なせん定量の目安は明確となっていないため、栽培初心者は樹毎にせん定量を決定することに苦慮している。

そこで本報告では、せん定量の指標としてLAIに着目した。いくつかの果樹で、収量はLAIに強く影響を受けることが明らかとなっている^{7,8)}が、カンキツ類においてもLAIの増加にしたがって収量は増加し、一定以上のLAIとなると、密植の弊害として収量が減少し始めることが認められている⁹⁾。これらのことから、ユズにおいても、単位面積あるいは1樹あたりの収量を最大にする最適LAIが存在し、それを連年として維持できるようなせん定後のLAIを明らかにすることで、LAIをせん定量の目安として利用できると考えた。

しかし、実測LAIを算出するためには、樹体の総葉数に個葉面積を乗ずる必要があり、多大な時間と労力が必要で実際的ではない。そこで本研究では、非破壊かつ迅速にLAIを推定できるPCAに着目し、PCAによるLAIの測定方法について検討した。PCAは、センサー部分にある魚眼レンズで5つの天頂角別に490nm以上の放射光を遮蔽し測定することで、その比率から放射伝達モデルを用いてLAIを推定する。1回の測定時間は30秒程度と極めて短い。品目や栽培環境により測定方法が異なるが、露地ウンシュウミカンにおいては、90°のビューキャッ

プを装着したPCAを用い、主幹中心から60cm離れた4方位(北東、南東、南西、北西)の位置より測定し、7, 23, 38, 53°の4つの天頂角を用いて算出することで実測LAIの近似値を推定できることを明らかにしている¹⁰⁾。本研究の露地ユズにおいても、露地ウンシュウミカンとほぼ同様の設定で推定できる可能性が示唆されたが、測定に最適な主幹からの距離は80cmと、ウンシュウミカンの60cmとやや異なった。また、いずれの天頂角数の回帰式においても切片がマイナスとなった。これは8～9月の果実肥大期に測定したため、センサーが果実を葉とみなして評価した可能性や、果実の重みによる枝葉の下垂が影響した可能性が考えられた。そのため、せん定前後の未着果の樹体を用いてPCAの精度を検証した。その結果、4天頂角を用いた場合のPCA-LAIが最も実測LAIに近く、回帰直線もほぼ原点を通った。よって、90°のビューキャップを装着したPCAを用い、主幹中心から距離80cmで測定し、かつ4天頂角を用いて解析することで、未着果のユズではLAIを比較的に正確に推定できると考えられた。なお今回は、植栽間隔が4.0×3.0mと樹間の比較的広い園地での検討であったため、樹と樹が交差するような密植園の測定では、天頂角数を少なくすることや、ビューキャップを変更すること等を検討する必要があると考えられた。

次に、県内生産者園地の実態調査から生産性の高い園地を抽出し、収量とPCA-LAI等との関係を解析して、適正なせん定量を検討した。4年間の調査から、隔年結果指数が0.30未満の毎年安定した収量(低隔年結果性)かつ2.1kg/m³以上の高い収量(高収量性)である3園地(安芸C園、香美B園および香美C園)を抽出した。この3園地は樹形、樹高および樹容積が異なるものの、10aあたりの樹冠占有面積率が80%以下と低く、せん定後LAI、LAI減少量およびLAI減少率(%)は比較的近い値であった。一方で、低収量性かつ高隔年結果性の2園地について、安芸B園は10aあたりの樹冠占有面積率が97.8%と高く、香美D園は10aあたりの樹冠占有面積率が80%以下と低いものの、植栽間隔が狭く樹容積が小さかった。また、高隔年結果性の安芸A園および低収量性の香美A園は、10aあたりの樹冠占有面積率が80%以下と低いものの、せん定後LAIがそれぞれ2.7および3.1と他園より低かった。さらに、高隔年結果性の安芸D園は、10aあたりの樹冠占有面積率が80%以上かつせん定後LAIが4.5と他園より高かった。このことから、ユズにおける適正なせん定量の目安は、10aあたりの樹冠占有面積率が80%以下かつ植栽間隔が概ね3.0×4.0mの場合、せん定後LAIは3.7、LAI減少量は1.7、LAI減少率は30.6%とするのが妥当と考えられた。ただし、隔年結果性および収量性は、せん定量のみならず、土質、施肥量、気象条件および収穫時期等にも左右されることに留意する必要がある。

以上のとおり、ユズにおけるPCAによるLAIの測定方法を明

らかにし、適正なせん定量を指標化した。なお、PCA は高額であるために、生産者が購入するのは現実的ではない。そこで、西森ら⁹⁾はスマートフォン搭載カメラに魚眼レンズを装着することでLAIを測定できるアプリ(以下、LAIアプリ)を、NECソリューションイノベータ株式会社と共同で開発した。このLAIアプリと本報告が、ユズの新規就農者のせん定技術の早期習得に役立つことを期待する。

利益相反の有無

すべての著者は開示すべき利益相反はない。

引用文献

- 1) Hoblyn, T. N., N. H. Grubb, A. C. Painter and B. L. Wates (1936). Studies in Biennial Bearing-I. J. Pom. Hort. Sci. 14:39-76.
- 2) 菊池毅洋・高木信雄・喜多景治・三堂博昭・崎本孝江 (2009). カンキツの剪定方法の違いによる樹のエイジング調節. 愛媛農水研果樹セ研報. 1:17-23.
- 3) 高知県ゆず振興対策協議会 (2014). ゆず栽培マニュアル. P.28-32.
- 4) 森岡節夫・八幡茂木 (1981). 温州ミカンにおける整枝せん定方法が樹の発育, 収量, 果実の品質などに及ぼす影響 (第1報) 樹の発育と葉の分布状態. 千葉暖地園試研報. 12:1-8.
- 5) 森岡節夫・八幡茂木 (1985). 温州ミカンにおける整枝せん定方法が樹の発育, 収量, 果実の品質などに及ぼす影響 (第2報) 収量と果実の品質. 千葉暖地園試研報. 13:1-9.
- 6) 西森空・中野和彦・谷本佑・北沢知明 (2024). スマートフォンを用いたユズの葉面積指数(LAI)推定技術. 高知農技セ研報. 33:51-58.
- 7) 塩崎雄之輔・菊池卓郎 (1992). 葉面積指数および樹勢が開心形リンゴ樹の収量に及ぼす影響. 園学雑. 60(4):827-832.
- 8) 末澤克彦・土居新一 (1985). キウイフルーツの収量構成要因の定量化(第1報)最適葉面積指数の推定. 香川農試研報. 37:48-54.
- 9) 橋温・中井滋郎 (1989). 異なった栽植密度及び栽培条件におけるワセウンシュウの収量と葉面積指数との関係. 園学雑. 57(4):561-567.
- 10) 山本晴彦・岩谷潔 (2022). デジタルカメラを利用したカンキツ樹の総葉面積の計測. 農業技術大系果樹編. 第1-I巻. 東京. 農山漁村文化協会. 技22の20-22の22.

Summary

To establish an index to quantify the optimal amount of pruning for yuzu (*Citrus junos* Sieb. ex Tanaka), we used the Leaf Area Index (LAI). Plant Canopy Analyzer (PCA) measurement method for non-destructive and rapid estimation of LAI was determined to conduct this study. The appropriate amount of pruning was then indexed in terms of biennial bearing and yield. We found the following:

1. LAI measured using PCA (PCA-LAI) was closest to the actual LAI when it was measured with a 90° view cap at a distance of 80 cm from the center of the trunk in four directions (i.e., east, west, south, and north) and analyzed at four zenith angles (7, 23, 38 and 53°).
2. Based on a survey of yuzu farmers' orchards in Kochi prefecture, we selected orchards with high yields of 2.1 kg/m³ or more per tree volume (high-yielding) and stable yields every year with a biennial bearing index of less than 0.30 (low-biennial bearing). The orchards' LAI, LAI reduction and LAI reduction rates with high-yielding and low-biennial bearing were 3.7, 1.7, and 30.6%, respectively. These indices are indicative of the optimal amount of pruning necessary for yuzu.

Key words: biennial bearing, Plant Canopy Analyzer, amount of pruning, zenith angle