異なった栽植密度におけるワセウンシュウの樹冠密度と 収量及び葉面積指数との関係

橘 温・中井滋郎

千葉県暖地園芸試験場 294 館山市山本

Relationships between Crown Density, Yield and Leaf Area Index in
Different Planting Densities in Wase Satsuma Mandarins
(*Citrus unshiu* Marc. var. *praecox* Tanaka)

Sunao TACHIBANA and Shigeo NAKAI

Chiba Horticultural Experiment Station, Tateyama, Chiba 294

Summary

Two-year-old trees of 'Miyagawa Wase', an early-maturing cultivar of satsuma mandarin, were planted in 1967 under four different planting densities: 1,250, 2,500, 5,000 and 10,000 trees/ha. The relationships between crown density and yield, and between crown density and leaf area index (LAI) were investigated from data obtained from 1969 to 1986 (tree age 4 to 21 years). The contribution of several factors such as crown density, LAI and planting density affecting yield was also determined.

1. The relationships between crown density and yield, and between crown density and LAI showed a close fitness to the quadratic curve proofs. Quadratic regression coefficients became smaller as planting density increased. Yield per unit leaf area decreased with increasing planting densities.

2. The crown density which gave the highest yield (64 t/ha) was estimated to be 99%, as the quadratic curve showed. At this time LAI was estimated to be 6.8. LAI then increased toward the highest value (8.2) during six years after the orchard was almost covered by foliage.

3. In analyzing variation of yield, LAI made the greatest contribution. The contribution of crown density and planting density to yield was so small that effects of these factors were expected to be largely due to their influence on LAI.

緒 言

果樹の計画密植栽培において最も重要なことは、初期収量を多くあげ、樹の生育とともに逐次間伐を進め、収量・品質を高水準に維持しながら栽培を続けることである。間伐は、実際には樹冠の込み合い、あるいは隣接樹との樹冠間隔を指標として行われているので、栽植密度に関する試験においては、樹冠占有面積率と収量との関係について多く報告されている (1, 2, 23, 25)。また収量を構成する要因として葉面積指数 (LAI) 及び樹冠占有面積率の重要性が指摘され (25)、樹冠占有面積率と LAI、及び LAI と収量の関係についても報告されている (13, 24, 25, 31)。そしてこれらの関係はほとんどの場合、直線回帰を用いて検討されていて、いずれもかなり高い相

関関係を認めている。しかし本質的に収量、樹冠占有面積率、LAI の間の相互関係を知らうとする場合には、長期にわたるデータを用い、曲線回帰によって考察することがより妥当と考えられる。さらに樹冠占有面積率、LAI 及び栽植密度など収量に影響を及ぼす要因の相対的重要性を把握しておくことは、計画密植園を効率的に管理し、また収量構成要因を論ずるうえで重要と思われる。

以上のことから本研究においては、ワセウンシュウの 1,250~10,000 本/ha の密度条件における 4 年生時から 21 年生時までのデータを用い、樹冠密度と収量及び LAI との関係、及び樹冠密度、LAI 及び栽植密度などの収量に対する相対的寄与を明らかにするため統計的な解析を行った。

1988年4月8日 受理

材料及び方法

火山灰からなるほぼ平坦な埴壌土の圃場、70m×60mを東西に2分し、一方は無深耕とし、他方はブルドーザーで約0.6mの深さに深耕した。1967年3月、各圃場に2年生「宮川早生」（カラタチ台）をha当たり1,250, 2,500, 5,000及び10,000本の4つの栽植密度に正方形植えとして定植し、間伐は行わず栽培を続けた。各密度区はさらに2分して、一方を無せん定無摘果としてほぼ自然状態に放任し、他方は開心自然形としてやや弱いせん定を行い、また葉果比でほぼ35になるように結果量を調整した。深耕区の施肥量は、ha当たり窒素（硫安）270kg、リン酸（過リン酸石灰）240kg、及びカリ（塩化カリウム）220kgとした。無深耕区の施肥量は深耕区の1/2量とした。

収量は結果初年時の4年生（1969年）から各処理区24～40樹について調査したが、著しい隔年結果を示した（30）ので、2か年の平均を用いた。同様に後述のLAI及び樹冠密度も2か年の平均を用いた。

LAIについては、まず各密度区において、試験区の中央付近の平均的な大きさの樹を3本ずつ選び、毎年6月に全葉数を調査した。3月のせん定時に、上記3本の樹のせん定枝における総ての葉から1枚当たりの重さを算出し、平野らの方法（12）にしたがって、葉重（ x g）と葉面積（ y cm²）の回帰式 $y=28.17x^{0.8877}$ により1枚当たりの葉面積を推定した。これと全葉数から1樹当たりの全葉面積を求め、栽植面積で割ってLAI（m²/m²）を算出した。この実験で用いた1枚当たりの平均葉面積は、18.5 cm²であった。

樹冠占有面積率は、各処理区の中央付近の12樹について、次のようにして測定した。まず20cm目の格子を描いたベニヤ板を樹冠下とその周辺に敷いた。そして細い竹棒を垂直に立て、それを樹冠の縁に軽く触れながら

ほぼ10cmごとに移動させ、竹棒の下端が描く軌跡をグラフ用紙に写した。竹棒の移動に際して幅10cm以下の樹冠の間隙は無視した。この方法でグラフ用紙に投影された樹冠占有面積をプランメーターで測定し、これと圃場面積とから樹冠占有面積率を計算した。

樹冠密度は、樹冠の込み合いの程度を表し、樹冠占有面積率が100%に達するまでは樹冠占有面積率で示した。また樹冠占有面積率が100%に達した以後は、その経過年数を示した。100%より右側の経過年数の目盛り間隔は、回帰曲線を求めるに際し、収量及びLAIのデータが二次曲線によく適合するようにシミュレーションを行って決定した。

各要因の収量に対する寄与率は、廣崎らの方法（14）を用いて求めた。すなわち収量の変動をLAIによる単回帰で説明し、その残差を樹冠密度で説明し、さらに両者によって収量の変動を説明した時の残差を栽植密度で説明した。本実験は3因子の要因実験： $2^2 \times 4$ として行い、この実験における因子、記号、水準、及び重回帰解析に用いた変数は第1表のとおりである。

結果及び考察

1. 各栽植密度における樹冠密度と収量及びLAIとの関係

1,250, 2,500, 5,000及び10,000本/ha区における樹冠密度と収量及びLAIとの関係は第1図に示した。数値は各栽植密度における無深耕少肥、深耕施肥、無せん定無摘果、及びせん定摘果などの処理区、及び4～21年生までの樹齢を込みにした値である。ただし5,000及び10,000本/ha区は、18年生時に調査を打ち切ったので、4～17年生時のデータを用いた。

樹冠密度と収量との間の相関係数Rは、1,250本区：0.955, 2,500本区：0.878, 5,000本区：0.667, 及び10,000本区：0.653であり、また樹冠密度とLAIとの

Table 1. Factor, level and variable in the factorial experiment.

Factor	Symbol	Level	
Soil fertility	X_1	(1) Shallow plowing+less fertilization (2) Deep plowing+standard fertilization	
Planting density (trees/ha)	X_2	(1) 1,250 (3) 5,000	(2) 2,000 (4) 10,000
Pruning and fruit thinning	X_3	(1) Non pruning+non fruit thinning (2) Pruning+fruit thinning	
Variable	Symbol	Variable	Symbol
LAI	X_4	$(X_5-\overline{X_5})^2$ (%)	X_6
Crown density (%)	X_5	Yield (t/ha)	X_7

Fig. 1. Relationships between crown density and yield, and crown density and LAI in different planting densities.

X; Crown density (%), X' ; The year after X reached 100%.

○—○: Yield, ●—●: LAI.

(1); 1,250 trees/ha, (2); 2,500 trees/ha, (3); 5,000 trees/ha, (4); 10,000 trees/ha.

**; Significant at 1% level.

間のRは、1,250本区; 0.964, 2,500本区; 0.826, 5,000本区; 0.846, 及び10,000本区; 0.265であった。このように樹冠密度と収量及びLAIとの間のRは、栽植密度が高くなるとともに小さくなったが、10,000本区におけるR以外は1%水準で有意性を示し、二次曲線によく適合した。

収量及びLAIの曲線から、単位葉面積当たり果実生産力を比較すると、樹冠密度が100%までの範囲では、1,250及び2,500本区はほぼ 1 kg/m^2 以上を示したのに対して、5,000及び10,000本区は 1 kg/m^2 以下であった。単位葉面積当たり果実生産力は、栽植密度が高くなるにしたがって低くなり、樹冠密度が100%に達した後では急激に低下した。

樹冠密度に対する収量またはLAIの変動は、相関係数Rの値からも推察されるように、栽植密度が高くなるにしたがって大きくなり、また上述のように単位葉面積

当たり果実生産力も低くなった。これは、栽植密度が高い場合には相対的に樹冠密度が高く、したがって葉面積密度(11, 24)及び根群密度(4, 5, 6, 10, 19)も高くなり、日照不足(27)による光合成速度の低下、及び養水分の競合(7)などが原因となり樹勢が衰弱し、それにとまらう着果量の増減、樹勢の衰弱と回復とが繰り返されるためと考えられる。また本実験において樹冠密度が高い場合には、木の高くなる傾向も観察され、病虫害や寒風の被害の大きかったことも原因と考えられる。したがって間伐による栽植密度の調節は、光、土壌水分、無機養分などの環境要因を生育に最適にコントロールすることを意味している(15, 20)。間伐は、これらの環境要因を通して生じる個体間の競争を緩和することであり、具体的には収量とLAIの変動を小さくし、また単位葉面積当たり果実生産力を向上させるものと推測される。

Fig. 2. General relationships between crown density (X_5) and yield (X_7), and crown density (X_5) and LAI (X_4).

X ; Crown density (%),

X' ; The year after X reached 100%, $X=100+10X'$.
—; Yield, $X_7 = -0.008750X_5^2 + 1.7298X_5 - 21.4599$,
 $R^2 = 0.6499^{**}$,

----; LAI, $X_4 = -0.0004269X_5^2 + 0.1326X_5 - 2.0852$,
 $R^2 = 0.6725^{**}$.

** ; Significant at 1% level.

2. 樹冠密度と収量及び LAI との一般的関係

第2図は、総ての処理区及び樹齢を込みにして樹冠密度と収量及び LAI の一般的関係を回帰曲線で示したものである。樹冠占有面積率が100%に達した後の年数が X' で、樹冠密度(%)が X_5 のとき、100%より右側の値を $X_5 = 100 + 10X'$ とすると、各曲線の式は次のとおりである。

$$X_4 = -0.0004269X_5^2 + 0.1326X_5 - 2.0852,$$

$$R^2 = 0.6725 \text{ (} P < 0.01 \text{)}, \text{ ただし } X_4 = \text{LAI.}$$

$$X_7 = -0.008750X_5^2 + 1.7298X_5 - 21.4599,$$

$$R^2 = 0.6499 \text{ (} P < 0.01 \text{)}, \text{ ただし } X_7 = \text{収量 (t/ha).}$$

本式から、樹冠密度99%の時に最高収量64 t/ha、及び LAI 6.8 が推定された。単位葉面積当たり果実生産力は0.94 kg/m²であった。また最大 LAI 8.2は、樹冠密度が100%に達した6年後に示された。

実際栽培におけるウンシュウミカンの樹冠密度は、収量・品質及び作業能率などを考慮すると、80%程度が適切と考えられる(16, 32)。またリンゴにおいては最大80%と考えられている(9)。樹冠密度80%の時に、第2図から収量及び LAI は61 t/ha 及び5.8と推定された。単位葉面積当たり果実生産力は1.05 kg/m²であった。

樹冠密度の関数である LAI について、最大の LAI: 8.2、収量を最高とする LAI: 6.8、及び収量・品質及び作業能率を考慮した LAI: 5.8 の存在が明らかとなった。このようなことは、岸本(21, 22)が経験的に指摘していて、葉量が最大の場合を最大 LAI、収量が最大の場合を最適 LAI とすると、LAI の最大と最適との間に差異があるとしている。本実験結果は、このことを圃場条

Table 2. Contribution of factors to yield (%).

Factor	A	B
LAI	70**	31**
Crown density	1 NS	34**
Planting density	7*	4*
Soil and pruning	5 NS	4 NS
Total	83**	74**

A: Crown density <100%, number of samples, 63.

B: Including crown density >100%, number of samples, 128.

Soil and pruning: Deep plowing+standard fertilization, and pruning+fruit thinning.

*, **: Significant at 5% and 1% level.

件で実証したものであり、ウンシュウミカンにおいては、収量・品質の最適 LAI が存在することも明らかとなった。この場合、単位葉面積当たり果実生産力は、収量が最高を示した時よりやや大きかった。

3. 収量における LAI、樹冠密度及び栽植密度の寄与率

収量に対する各要因の寄与率は、樹冠密度が100%以下の場合、及び100%以上をも含めた場合に分け第2表に示した。

(1) 樹冠密度が100%以下の場合：深耕施肥(X_1)、栽植密度(X_2)、せん定摘果(X_3)、LAI(X_4)及び樹冠密度(X_5)などの各要因による収量(X_7)の重回帰式は次のようであった。

$$X_7 = -4.809X_1 - 3.831X_2 + 2.124X_3 + 2.916X_4 \\ + 0.505X_5 + 12.132. \quad R^2 = 0.827.$$

収量の変動は、上式によって83%説明できることが明らかとなったが、そのうち LAI の寄与率は70%で著しく大きかった。栽植密度の寄与率は、有意ではあったが7%で小さかった。樹冠密度、深耕施肥及びせん定摘果の寄与率はさらに小さいものであった。

(2) 樹冠密度が100%以上をも含めた場合：各要因による収量の重回帰式は次のとおりである。

$$X_7 = -1.559X_1 - 4.923X_2 - 4.254X_3 + 1.903X_4 \\ + 0.0454X_5 - 0.00805X_6 + 67.410. \quad R^2 = 0.740.$$

これらの要因によって収量の変動は74%説明することができたが、LAI の寄与率は3-(1)の場合に得られた70%から31%に減少した。一方樹冠密度の寄与率は、1%から34%に増加した。栽植密度の寄与率は、有意性を示したが小さかった。また深耕施肥及びせん定摘果も著しく小さかった。

果樹の密植栽培において樹冠間隔は、樹冠全体の受光状態によって収量・品質につよく影響を及ぼすので、適正な樹冠間隔についての報告は多い(3, 8, 9, 17, 18, 23,

26, 28, 33). また樹冠間隔とほぼ同様の意味をもつ樹冠密度と収量との関係を検討した報告もみられ (1, 2, 23, 25), いずれも高い相関を認めている. 小野ら (25) は, 樹冠密度と収量, 及び LAI と収量との間の高い相関を認め, 両者は重要な収量構成要因であるとしている. 本実験においては, 樹冠密度が 100% 以下の場合, 収量に対する LAI の寄与率は著しく大きく, 樹冠密度の寄与率は無視できる程度に小さかった. このことは, LAI と樹冠密度との相関がひじょうに高かったことにより ($R=0.928$), 樹冠密度と収量との疑似相関 (29) が高くなったため ($R=0.889$), 収量構成要因としての樹冠密度は LAI を通して間接的に寄与しているといえる.

樹冠密度が 100% 以上をも含めた場合には, 収量に対する寄与率は LAI においてはほぼ半減し, 一方樹冠密度においてはほぼその減少分が増加した. この原因は, LAI と収量及び樹冠密度との相関が 3-(1) の場合よりかなり低くなったためである. すなわち, 樹冠密度 100% 以上における目盛り間隔は年次であり, 収量はそれまでの増加傾向から年次にともなう著しい減少傾向に転じたのに対して, LAI は微増傾向にあったことが原因と考えられる.

栽植密度, 深耕施肥, 及びせん定摘果の寄与率は, LAI より著しく小さかった. これらの要因はまず LAI に影響を及ぼし (31), そして LAI を通して収量に影響することを示していて, 樹冠密度とともに重要な要因であることにはかわりない.

摘 要

ウンシュウミカン ‘宮川早生’ を 1, 250, 2, 500, 5, 000 及び 10, 000 本/ha の密度条件で 1967 年に植栽し, 間伐を行わずに栽培を続けた. その間に得られた 4~21 年生 (1969~1986 年) のデータをもとに, 樹冠占有面積率が 100% に達した以後は経過年数で示した樹冠密度と収量及び葉面積指数 (LAI) との関係, さらに収量に対するこれらの要因及び栽植密度などの相対的寄与を検討した.

1. 各栽植密度における樹冠密度と収量及び LAI との関係は, ほとんどの場合二次曲線によく適合したが, 二次相関係数 R は, 栽植密度が高くなるにしたがって小さくなった. 単位葉面積当たり果実生産力は, 栽植密度が高くなるにしたがって低くなった.

2. 樹冠密度と収量及び LAI との一般的関係から, 樹冠密度 99% のときに最高収量 64t/ha, 及び LAI 6.8 が推定された. LAI は, このとき増加傾向にあったが, うっ閉状態に達した 6 年後に最大 8.2 を示した.

3. 収量の変動解析において, LAI の寄与率が最も高

かった. 樹冠密度及び栽植密度などの要因の寄与率は, LAI より著しく低く, これらの要因は, LAI を通して収量に影響を及ぼすと考えられた.

謝 辞 本研究を行うに際し, 実験を企画され, かつ指導助言を賜った平野 暁東京農業大学教授に謝意を表します. また有益な示唆を賜った石崎政彦前和歌山県果樹試験場長に敬意を表します. 統計的解析を行うにあたって, 指導助言をいただいた塩見正衛草地試験場生態システム研究室長にお礼申しあげます.

引用文献

1. 安藤吉寿・青木秋広. 1979. クリの計画密植栽培における縮伐の程度と間伐の時期について. 栃木農試研報. 25: 33—38.
2. 青木秋広. 1971. クリの計画密植栽培における若木時代の生育と収量との関係. 栃木農試研報. 15: 89—94.
3. 荒木 斉. 1981. クリの結実に関する生理生態的研究. 兵庫農試特別研報. p. 1—92.
4. ATKINSON, D. 1976. Preliminary observations of the effect of spacing on the apple root system. *Scientia Hort.* 4: 285—290.
5. ATKINSON, D., D. NAYLOR and G.A. COLDRIK. 1976. The effect of tree spacing on the apple root system. *Hort. Res.* 16: 89—105.
6. ATKINSON, D. 1978. The use of soil resources in high density planting systems. *Acta Hort.* 65: 79—89.
7. ATKINSON, D. 1981. Water use and the control of water stress in high density plantings. *Acta Hort.* 114: 45—56.
8. CAIN, J.C. 1969. Tree spacing in relation to orchard production efficiency. *N.Y. Agr. Exp. Sta. Res. Cir.* 15: 1—10.
9. CAIN, J.C. 1970. Optimum tree density for apple orchards. *HortScience* 5: 232—234.
10. CASTLE, W.S. 1980. Fibrous root distribution of ‘Pineapple’ orange trees on rough lemon rootstock at three tree spacings. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 105: 478—480.
11. 平野 暁・森岡節夫. 1964. 列植え温州ミカンにおける葉の分布, 樹の生長及び果実収量. 第 1 報. 列間隔と葉の空間分布. 園学要旨. 昭49春: 64—65.
12. 平野 暁・森岡節夫・中井滋郎・岩田正久. 1969. カンキツの葉面積測定法. 第 1 報. 1 枚の葉の葉面積の推定. 千葉暖地園試研報. 1: 11—15.
13. 平田克明・秋元稔万・小林英郎. 1980. 日本ナシ幸水, 新水の品種特性および生産力増強に関する研究. 園学要旨. 昭55春: 74—75.
14. 廣崎昭太・小林藤雄. 1979. 予測平方和 (PSS) による重回帰式の変数選択. 農林研究センター報告 A15: 45—104.

15. HOZUMI, K., T. ASAHIRA and T. KIRA. 1956. Intraspecific competition among higher plants. VI. Effect of some growth factors on the process of competition. Jour. Inst. Polytech. Osaka City Univ. D7: 15—34.
16. 岩垣 功. 1981. 温州ミカンの各種樹形の合理性と問題点. 農及園. 56: 894—898.
17. JACKSON, J.E. 1971. Effects of light climate in apple orchards. A. D. A. S. Quart. Rev. 3: 109—120.
18. JACKSON, J.E. 1980. Light interception and utilization by orchard systems. Hort. Rev. 2: 208—267.
19. KAUFMANN, M.R., S.B. BOSWELL and L.N. LEWIS. 1972. Effect of tree spacing on root distribution of 9-year-old 'Washington' navel oranges. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 97: 204—206.
20. 吉良竜夫・穂積和夫・小川房人・上野善和. 1953. 栽植密度問題の生態学的考察. 園芸学研究収録. 6: 69—81.
21. 岸本 修. 1970. 日本ナシの整枝せん定についての一試論 (1). 農及園. 45: 1657—1662.
22. 岸本 修. 1978. カキとナシにおける摘果とせん定の適正度に関する研究. 宇都宮大学農学部学術報告特輯. 33: 1—78.
23. 今喜代治・神戸和猛登・久米靖穂. 1971. リンゴ園の栽植密度に関する研究. 第2報. ゴールデンデリシャスの栽植本数. 秋田果試報. 4: 15—31.
24. 小野祐幸・工藤和典. 1983. 温州ミカンの光合成作用および生産構造に関する研究. 第7報. 密植条件と樹体の生産構造. 四国農試報. 41: 101—113.
25. 小野祐幸・岩垣 功・高原利雄. 1987. カンキツ園の収量構成要因に関する研究. 果樹試報. D9: 51—62.
26. PALMER, J.W. and J.E. JACKSON. 1977. Seasonal light interception and canopy development in hedgerow and bed system apple orchards. J. Appl. Ecol. 14: 539—549.
27. PALMER, J.W. 1981. Computed effects of spacing on light interception and distribution within hedgerow trees in relation to productivity. Acta Hort. 114: 80—88.
28. PARRY, M.S. 1978. Integrated effects of planting density on growth and cropping. Acta Hort. 65: 91—100.
29. 斎藤金一郎. 1968. 相関関係. 現代統計実務講座. I. p. 126—127. 実務教育研究所. 東京.
30. 橋 温・森岡節夫・中井滋郎. 1987. ウンシュウミカンの栽植密度と栽培条件が収量に及ぼす影響. 園学雑. 56: 9—15.
31. 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: 561—567.
32. 橋 温・中井滋郎. 1989. ワセウンシュウにおける栽植密度などの2, 3の栽培条件が樹冠占有面積率に及ぼす影響. 園学雑. 58: 83—89.
33. 薬師寺清司. 1970. 温州ミカンの栽植密度に関する研究—計画密植の基礎理論—. 愛媛果試研報. 6: 1—86.