

仕立て方法および樹冠の形状に関する特性値の違いが リンゴ園の光環境に及ぼす影響 —モデル手法を用いた解析例—

山本 隆儀

山形大学名誉教授
(平成26年11月7日受理)

Effects of Differences in Trainig Systems and Characteristics of Canopy Shape on Light Environment in Apple Orchards : Analytical Results Using Model Methods

Takanori YAMAMOTO

Professor Emeritus, Yamagata University, Tsuruoka 997-8555, Japan
(Received November 7, 2014)

Summary

One hundred eighteen 'Fuji' apple trees were constructed by combining five kinds of training systems (TSs) with several parameters for training-pruning (PTPs) using the model method described in the previous paper (Yamamoto, 2014). The simulation experiment on the light environment was done on each orchard where the each constructed tree was arranged to have an almost identical LAI per orchard area (LAIo). As the result, in the end of July of the 15-year and the 20-year of tree ages, there was some fluctuation of the light environment among the 118 orchards in spite of almost equal LAIo. In addition, a considerably big difference of the daily mean leaf surface PPFD on a clear day (CDMPPFD) and that on an overcast day (ODMPPFD) was recognized to be about 32%. The rank correlation analyses after the 10-year of tree age showed that the order of the CDMPPFD or the ODMPPFD did not change greatly, even if the tree age differed. The multiple range tests for the CDMPPFDs between the five TSs after the 10-year of tree age indicated that there were following relations of the magnitudes, namely, trellis training (TT) \approx slender central leader (SCL) \approx open center (OC) $>$ Y shape (YS) $>$ modified central leader (MCL). And that of the ODMPPFD indicated such relations as TT \approx SCL $>$ YS $>$ OC $>$ MCL. Within same TS, the mean of the CDMPPFDs in each PTP or that of the ODMPPFDs was calculated. The some means separated significantly by the difference in several PTPs, e.g. the number of secondary scaffold branches per primary scaffold branch. The characteristics of canopy shape (CCSs) of sum total of 107 were calculated. Factor analyses were carried out using the all CCSs at the four tree ages. The factors separated by the factor analyses included gap factor in set space, thickness factor of tree crown, north-side shape factor of tree crown, the south-side shape factor, tree height factor, leaf area density factor, LAI factor, vertical distribution factor of foliage biomass, leaf agglomeration factor and gap factor within tree crown. High positive or high negative correlations were widely recognized between the CCSs and the CDMPPFDs or the ODMPPFDs. The all factors, which were found by the factor analyses, were incorporated in the multiple regression of the CDMPPFD or the ODMPPFD by a stepwise method. And, over about 90% of their fluctuation among the 118 orchards were explained by those variables. The effects of the differences in TS or PTP on the light environment quoted above were well explained by the CCSs changes, which were accompanied with the differences in TS or PTP. Then, evaluation of the 118 orchards was carried out using the results from the principal component analyses for the CCSs, the TSs and the ranks of light environment. As the result, the 118 orchards were almost distributed in each TS. The rank of CDMPPFD tended to be higher, as the score of the first principal component (degree of gap in the set space) was bigger, and that of the second principal component (thickness of tree crown) was smaller. However, some deviations from the relations were also found.

Key words : factor analysis, gap in tree crown, leaf area index per orchard, principal component analysis, simulation in 4D

緒 言

葉量を確保し、なおかつ、樹冠内光環境を良好に保つことは高品質多収果実の安定的生産にとって極めて重要である。特に光要求度の高いリンゴではこのことが見逃せない。果樹の光合成を積極的に高める栽培管理方法が極めて乏しい中、受光態勢の改善こそ、このための最も有効な方法であると考えられる。だが、この方面の研究は極めて少ない。

筆者が取り組んでいる一連の研究の戦略的目標は果樹の受光態勢の解明とこれに基づいた光環境や光合成を改善する理想的な樹冠（アイデアルクラウン, ideal crown）の創出である。このための研究の緒として、前報（山本, 2014）で、果樹園の光環境と光合成の動態をまず明らかにすべく、幾つかの実験を行った。すなわち、2種類の4次元シミュレーションモデルである果樹の樹形構築解析システム（CACOAS, 山本ら, 2004）および果樹園光環境解析システム（OLEAS, 山本, 1999）にリンゴ葉における純光合成速度の重回帰推定式（山本ら, 1995）を組み合わせた新手法（以下、モデル手法）を開発した。このモデル手法を用いて5種類の仕立て方法による少数の樹を構築し、それぞれを配植した仮想果樹園を対象に、樹冠内全葉における葉面の光合成有効光量子束密度（以下、葉面PPFD）と純光合成速度の毎時分布および1日における分布の特徴を明らかにした。さらに、これらの平均値について、季節的变化、経年的変化、樹列方向の影響、園地当たり葉面積指数の影響、栽植密度の影響などを調査した。さらに前報（山本, 2014）では、上記の動態調査の結果をふまえ、多数の園地を対象にするシミュレーション実験を効率的に行うときの必須調査項目と比較条件も明らかにした。

本報の研究目的は、上記の戦略的目標の1つ、果樹の受光態勢解明における基礎的知見を得ることである。このため最初に、5つの仕立て方法と数組の整枝剪定パラメータを組み合わせることで合計118本の様々な樹を20年間にわたり構築した。次に、これらを果樹園当たりLAI（以下、園地LAIまたはLAIo）がほぼ等しくなるように一定の栽植距離を用いて配植することで合計118個の仮想果樹園を準備した。そして、これら果樹園の光環境と光合成のシミュレーション実験を実施したものである。加えて、各樹の樹冠の形状に関する多くの特性値（以下、樹冠形状値）を調査した。さらに、上記シミュレーシ

ン実験結果を対象に、前報で得られた必須調査項目と比較条件に沿って、仕立て方法および樹冠形状値の違いがリンゴ園の光環境と光合成に及ぼす影響を多方面から解析した。なお、分量の関係から、本報では光環境に限定した実験結果のみを記したものである。

本報における実験の柱を具体的に列挙すると以下の通りである。シミュレーション実験結果を用いた118園地における光環境の変動範囲と序列、118園地における光環境の樹齢間および天候間の単相関と順位相関および仕立て方法と整枝剪定パラメータの違いが果樹園の光環境に及ぼす影響を調査したものである。加えて本報では樹冠形状値のデータを用いて、樹冠形状値の因子分析、樹冠形状値と果樹園光環境の間の単相関および重相関、仕立て方法と整枝剪定パラメータの違いが樹冠形状値に及ぼす影響および樹冠形状値の主成分分析結果などを用いた118園地の総合評価などの調査を行ったものである。なお、本報の中味のほとんどは上記118園地の比較や解析であるため、モデル手法の中味や樹形・光環境などの詳細な動態をもっと知りたい方は既報（山本, 2014）を参照されたい。

材料および方法

1. CACOASによるシミュレーションの方法

CACOASの詳細については既報（山本ら, 2004；山本, 2014）を参照されたい。また、CACOASに用いたリンゴ‘ふじ’の枝葉生長を推定するためのパラメータ類については前報（山本, 2014）に準じた。ここでは5つの仕立て方法にまたがる合計118樹を構築したときの割り当て空間、樹間距離、樹列間距離、骨格枝の配置および整枝剪定パラメータを記したものである。

1) 各仕立て方法における割り当て空間、樹間距離および樹列間距離

放任樹と異なり、CACOASは南北樹幅制限（LSNW）、東西樹幅制限（LEWW）および樹高制限（LTH）からなる割り当て空間（set space）の内部に樹を構築した（第1図）。本研究では樹高制限を3.5mとした。割り当て土地区画のサイズ（南北樹幅制限×東西樹幅制限）は仕立て方法により異なった。すなわち、開心形仕立て（OC）、変則主幹形仕立て（MCL）およびY字形仕立て（YS）の3者では4m×4m、細形主幹形仕立て（SCL）では3m×3mとした。樹列方向を南北としたトレリス誘引仕立て

(TT) では4m×2mとした. このときのトレリスは垂直棚であった. なお, 上記割り当て空間や割り当て土地区画のサイズは本報特有なもので, 実際には様々なものがあることを断っておきたい. また, 異なる仕立て方法でも園地LAI (LAIo) が毎年等しくなるようにするために以下の栽植距離を用いた. すなわち, 樹間距離×樹列間距離は, 開心形仕立て (OC), 変則主幹形仕立て (MCL) およびY字形仕立て (YS) の3者では4m×5.9m, 細形主幹形仕立て (MCL) では3m×4.5m, トレリス誘引仕立て (TT) では4m×3.05mとした. なお, OLEASの計算原理から, 上記栽植距離の設定には3次元グリッド (以下, グリッド) を構成するブロック1辺長の整数倍の長さを用いたが, このときに発生する僅かな系統誤差の詳細については前報 (山本, 2014) に記した.

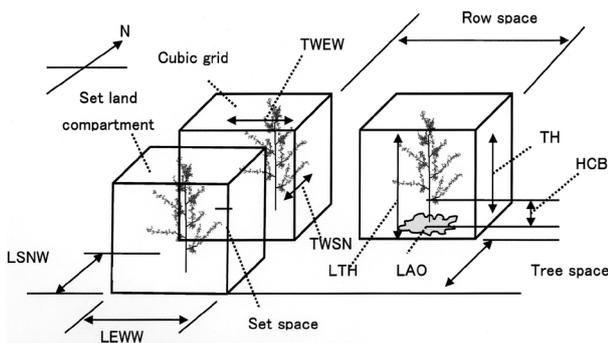


Fig.1 Upper limit of south-north tree width (LSNW), upper limit of east-west tree width (LEWW), upper limit of tree height (LTH), set space, set land compartment, cubic grid, tree space, row space and area occupied by a crown (LAO), height of crown bottom (HCB) and dimensions (TH, TWEW and TWSN) of a tree which was constructed by CACOAS.

2) 骨格枝の配置および整枝剪定

骨格枝の配置は, 各仕立て方法とも以下のように一律にした. 開心形仕立て (OC) では主幹の長さは90cm, 主枝数は3本, 主枝発生における回転角度差は120度, 第1主枝の方角は南東, 第1主枝の発生位置は地上80cm, 主枝発生間隔は均等, 主枝の立ち上がりは急, 第1垂主枝の発生位置は主枝基部から20cm, 垂主枝間隔は均等であった. 変則主幹形仕立て (MCL) では主幹の長さは150cm, 主枝数は5本 (樹齢7年で第5主枝を除去し, 以降4本), 主枝発生における回転角度差は144度, 第1主枝の方角は南東, 第1主枝の発生位置は地上80cm, 主枝発生間隔は均等, 主枝の立ち上がりは緩, 第1垂主枝の発生位置は主枝基部から20cm, 垂主枝間隔は均等であった. Y字形仕立て (YS) では主幹の長さは80cm, 主枝数は2本, 主枝発生における回転角度差は180度, 第1主枝の方角は東, 第1主枝の発生位置は地上70cm, 主枝の立ち上がりは急, 第1垂主枝の発生位置は主枝基部から20cm, 垂主枝間隔は均等であった. 細形主幹形仕立て (SCL) では主幹の長さは250cm, 主枝数は13本, 主枝発生における回転角度差は144度, 第1主枝の方角は南東, 第1主枝の発生位置は地上60cm, 主枝発生間隔は均等, 主枝の立ち上がりは緩, 第1垂主枝の発生位置は主枝基部から15cm, 垂主枝間隔は均等であった. ただし, 細形主幹形仕立てにおいては, 通常, 主枝に相当する枝を側枝と呼ぶが, ここでは読者の混乱を避けるため, 本報では主枝として扱ったものである. トレリス誘引仕立て (TT) では主幹の長さは240cm, 主枝数は7本, 主枝発生における回転角度差は180度, 第1主枝の方角は南, 第1主枝の発生位置は地上50cm, 主枝発生間隔は均等,

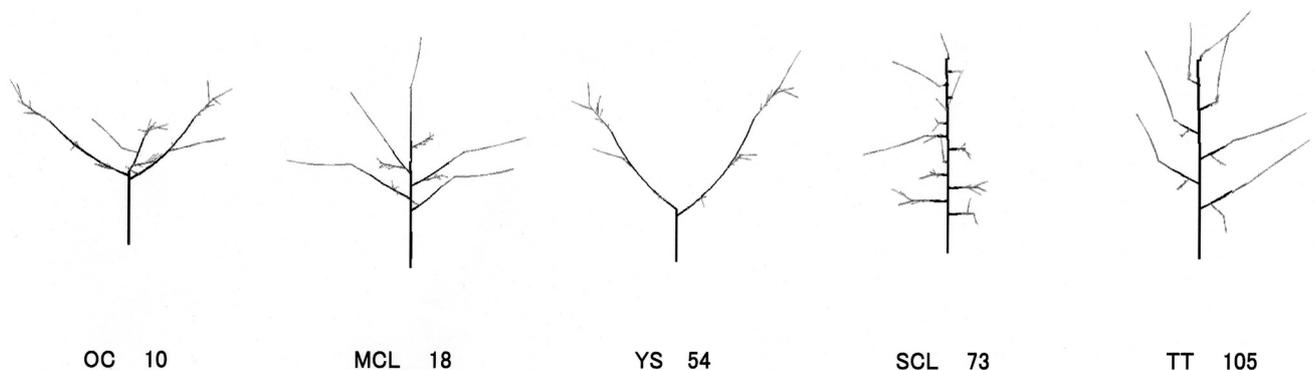


Fig.2 Each one example of tree shape image from CACOAS at pre-pruning in the 3-year of tree age in the five training systems; open center (OC), modified central leader (MCL), Y shape (YS), slender central leader (SCL) and trellis training (TT). The numeral indicates the tree number shown in Table 2.

主枝の立ち上がりは緩、第1垂主枝の発生位置は主枝基部から10cm、垂主枝間隔は均等であった。なお、曲率半径3mの主枝あるいは4mの主枝を主幹から真横に発生させ、それぞれ、主枝の立ち上がりが急あるいは緩としたものである。樹齢3年における各仕立て方法の樹形図（CACOASからの画像出力）の例を第2図に示した。

上記のように本研究において骨格枝の配置方法は各仕立て方法とも一律であったが、後述の整枝剪定パラメータを組み合わせたとき多くの樹が生まれた。ところで、第1主枝の発生位置を上記以外の位置、第1主枝の方角を上記以外の方角に、主枝発生間隔を均等以外にも設定すれば、合計樹数は2倍、4倍、8倍のように増え続け、際限が無くなる。よって、骨格枝の配置方法については各仕立て方法とも一律にしたものである。

各仕立て方法内に幾つかの整枝剪定パラメータの選択肢を設けることで数多くの樹を構築した。整枝剪定パラメータの選択肢（第1表）として、主枝長分布（DPPSBL）には等長（EL）と下長上短（BL）、主枝分岐角度（BADPPSB）には等角度（EA）と下広上狭（BW）、垂主枝長分布（DPSSBL）には等長（EL）と下長上短（BL）、および新梢間引き（横枝を残し、立ち枝を除去）の際の新梢傾斜角度限界（LIAVS）には50度と70度のそれぞれ2個の選択肢を設けた。このほか、主枝当たり垂主枝数（NSSB）として、開心形仕立て（OC）、変則主幹形仕立て（MCL）およびY字形仕立て（YS）の3者では3本と5本、細形主幹形仕立て（SCL）では1本と2本、トレリス誘引仕立て（TT）では2本と3本のそれぞれ2個の選択肢を設けた。第2表に118樹における仕立て方法と整枝剪定パラメータの組み合わせを記した。ただし、これ以外に、骨格枝配置の場合と同じ理由（実験樹数の制限）から選択肢を設けなかった整枝剪定パラメータがあった（第2表には不掲載）。たとえば、分岐角度の狭い新梢を間引くときの限界分岐角度とか、隣り合わせの新梢を間引くときの間引き間隔については、いずれも一律とし、前者では30度以下ならば間引き、後者では2本に1本の割合で間引いたものである。

CACOASは、枝葉生長の推定用パラメータを用いて毎年枝葉を形成させ、一方、整枝剪定パラメータに基づき、間引き剪定や切り返し剪定を毎年実施した。しかも、上述の割り当て空間をはみ出たときには、太枝落としも含めた整枝剪定を自動的に行った。仕立て方法によってLAIcは大きく影響されたが、割り当て土地面積当たり

Table 1 Several parameters for training-pruning in the five training systems; open center (OP), modified central leader (MCL), Y shape (YS), slender central leader (SCL) and training to trellis (TT). The abbreviations of the parameters were used Table 2.

	Parameters for training-pruning				
	Abbreviations				
Distribution pattern of primary scaffold branch (PSB) length	DPPSBL	Equal length (EL) or bottom longer (BL)	El or BL	El or BL	El or BL
Branching angle distribution pattern of PSB	BADPPSB	Equal angle (EA) or bottom wider (BW)	EA or BW	EA or BW	EA or BW
Number of secondary scaffold branches (SSBs) per PSB	NSSB	3 or 5	3 or 5	3 or 5	1 or 2
Distribution pattern of SSB length	DPSSBL	Equal length (EL) or bottom longer (BL)	El or BL	El or BL	El or BL
Limitative inclination angle of vegetative shoot in thinning	LIAVS	50° or 70°	50° or 70°	50° or 70°	50° or 70°

Table 2 Values of parameters for training-pruning (VPTPs) of the 118 trees. The abbreviations of the parameters for training-pruning refer to Table 1.

Tree No.	Training	DPPSBL	BADPPSB	NSSB	DPSSBL	LIAYS	Tree No.	Training	DPPSBL	BADPPSB	NSSB	DPSSBL	LIAYS	Tree No.	Training	DPPSBL	BADPPSB	NSSB	DPSSBL	LIAYS	Tree No.	Training	DPPSBL	BADPPSB	NSSB	DPSSBL	LIAYS
1	OC	EL	EA	3	EL	50 ²	31	MCL	BL	EA	2	BL	50	61	SCL	EL	EA	2	EL	50	91	TT	EL	EA	2	BL	50
2	OC	EL	EA	3	EL	70	32	MCL	BL	EA	2	BL	70	62	SCL	EL	EA	2	EL	70	92	TT	EL	EA	2	BL	70
3	OC	EL	EA	3	BL	50	33	MCL	BL	EA	3	EL	50	63	SCL	EL	EA	2	BL	50	93	TT	EL	EA	3	EL	50
4	OC	EL	EA	3	BL	70	34	MCL	BL	EA	3	EL	70	64	SCL	EL	EA	2	BL	70	94	TT	EL	EA	3	EL	70
5	OC	EL	EA	5	EL	50	35	MCL	BL	EA	3	BL	50	65	SCL	EL	BW	1	EL	50	95	TT	EL	EA	3	EL	50
6	OC	EL	EA	5	EL	70	36	MCL	BL	EA	3	BL	70	66	SCL	EL	BW	1	EL	70	96	TT	EL	EA	3	BL	70
7	OC	EL	EA	5	BL	50	37	MCL	BL	BW	2	EL	50	67	SCL	EL	BW	1	BL	50	97	TT	EL	BW	2	EL	50
8	OC	EL	EA	5	BL	70	38	MCL	BL	BW	2	EL	70	68	SCL	EL	BW	1	BL	70	98	TT	EL	BW	2	EL	70
9	OC	BL	EA	3	EL	50	39	MCL	BL	BW	2	BL	50	69	SCL	EL	BW	2	EL	50	99	TT	EL	BW	2	BL	50
10	OC	BL	EA	3	EL	70	40	MCL	BL	BW	2	BL	70	70	SCL	EL	BW	2	EL	70	100	TT	EL	BW	2	BL	70
11	OC	BL	EA	3	BL	50	41	MCL	BL	BW	3	EL	50	71	SCL	EL	BW	2	BL	50	101	TT	EL	BW	3	EL	50
12	OC	BL	EA	3	BL	70	42	MCL	BL	BW	3	EL	70	72	SCL	EL	BW	2	BL	70	102	TT	EL	BW	3	EL	70
13	OC	BL	EA	5	EL	50	43	MCL	BL	BW	3	BL	50	73	SCL	BL	EA	1	EL	50	103	TT	EL	BW	3	BL	50
14	OC	BL	EA	5	EL	70	44	MCL	BL	BW	3	BL	70	74	SCL	BL	EA	1	EL	70	104	TT	EL	BW	3	BL	70
15	MCL	EL	EA	2	EL	50	45	YS	EL	EA	3	EL	50	75	SCL	BL	EA	1	BL	50	105	TT	BL	EA	2	EL	50
16	MCL	EL	EA	2	EL	70	46	YS	EL	EA	3	EL	70	76	SCL	BL	EA	1	BL	70	106	TT	BL	EA	2	EL	70
17	MCL	EL	EA	2	BL	50	47	YS	EL	EA	3	BL	50	77	SCL	BL	EA	2	EL	50	107	TT	BL	EA	2	BL	50
18	MCL	EL	EA	2	BL	70	48	YS	EL	EA	3	BL	70	78	SCL	BL	EA	2	EL	70	108	TT	BL	EA	2	BL	70
19	MCL	EL	EA	3	EL	50	49	YS	EL	EA	5	EL	50	79	SCL	BL	EA	2	BL	50	109	TT	BL	EA	3	EL	50
20	MCL	EL	EA	3	EL	70	50	YS	EL	EA	5	EL	70	80	SCL	BL	EA	2	BL	70	110	TT	BL	EA	3	EL	70
21	MCL	EL	EA	3	BL	50	51	YS	EL	EA	5	BL	50	81	SCL	BL	BW	1	EL	50	111	TT	BL	BW	2	EL	50
22	MCL	EL	EA	3	BL	70	52	YS	EL	EA	5	BL	70	82	SCL	BL	BW	1	EL	70	112	TT	BL	BW	2	EL	70
23	MCL	EL	BW	2	EL	50	53	YS	BL	EA	3	EL	50	83	SCL	BL	BW	1	BL	50	113	TT	BL	BW	2	BL	50
24	MCL	EL	BW	2	EL	70	54	YS	BL	EA	3	EL	70	84	SCL	BL	BW	1	BL	70	114	TT	BL	BW	2	BL	70
25	MCL	EL	BW	2	BL	50	55	YS	BL	EA	5	EL	50	85	SCL	BL	BW	2	EL	50	115	TT	BL	BW	3	EL	50
26	MCL	EL	BW	2	BL	70	56	YS	BL	EA	5	EL	70	86	SCL	BL	BW	2	EL	70	116	TT	BL	BW	3	EL	70
27	MCL	EL	BW	3	EL	50	57	YS	BL	EA	5	BL	50	87	SCL	BL	BW	2	BL	50	117	TT	BL	BW	3	BL	50
28	MCL	EL	BW	3	EL	70	58	YS	BL	EA	5	BL	70	88	SCL	BL	BW	2	BL	70	118	TT	BL	BW	3	BL	70
29	MCL	EL	BW	3	BL	50	59	SCL	EL	EA	1	BL	50	89	TT	EL	EA	2	EL	50							
30	MCL	EL	BW	3	BL	70	60	SCL	EL	EA	1	BL	70	90	TT	EL	EA	2	EL	70							

²Degree.

LAI (以下, LAIa) の年次目標値に従うように最終的に葉量が調整された。このとき, CACOASは2段階の葉量自動調節機能(粗調節機能と微調節機能)を用いながら(山本ら, 2004), LAIaをその年次目標値に一致させた。

2. OLEASを用いた果樹園光環境のシミュレーション

118樹それぞれを配植してできる118個の果樹園の光環境, つまり, 葉面PPFD (単位は $\mu E \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$) の日平均値や毎時平均値についてはOLEASのシミュレーション実験結果より算出したが, OLEASの詳細については既報(山本, 1999)を参照されたい。OLEASに用いた投射光データ, 光減衰係数の推定用パラメータなどについては前報(山本, 2014)に準じた。これらの集計データに関する毎時平均値および日平均値の表現方法についても前報に記したが(山本, 2014), 頻繁に使用し

たので, ここで本報でも簡単に説明しておきたい。すなわち, OLEASは指定された時刻ごとの葉面PPFDのデータを樹冠内全葉分について出力した。このデータをもとに, 毎時の葉面PPFD分布および1日としての葉面PPFD分布を算出した。また, 上記分布の平均値としての毎時平均葉面PPFDおよび日平均葉面PPFDには, 略号として, それぞれ, HMPPFDおよびDMPPFDを当てた。その上, 必要ならば前者には時刻を付した(たとえば, 12時ならば12HMPPFD)。さらに, 晴天(clear day)と曇天(overcast day)に分けて, それぞれ, 頭文字CとOを付け, CDMPPFD, ODMPPFD, C12HMPPFD, O9HMPPFDのように表現した。

緒言でも触れたが, 多数園地の比較調査を目的とするシミュレーション実験を効率的に行うための必須調査項目と比較条件(山本, 2014)を順守した。すなわち, (イ)

全葉調査, ロ) 晴天日と曇天日の調査, ハ) 全1日(6時~18時)の結果に基づく集計データ, ニ) 6月下旬~8月下旬の1時期, ホ) 樹齢10年~20年の間の定められた樹齢, ヘ) 園地LAIはその特異点付近の1つの値, ト) 樹列は1方向, チ) 各仕立て方法に対応した1樹割り当て土地区画, リ) 並木植えにし, 約1m程度の作業道を確保できる樹列間距離(栽植密度)などを順守した. この場合, 比較時期は7月下旬の1時期とした. 20年間にわたる樹の構築のためには, 樹齢ごとの目標園地LAIを与え, 葉量を調節せねばならない. 本報では, 開心形仕立て(OC), 変則主幹形仕立て(MCL)およびY字形仕立て(YS)の3者は樹齢5年では0.12, 樹齢10年では0.88, 樹齢15年では1.18および樹齢20年では1.32を用いた. ただし, 1.の1)に記した系統誤差のため, 細形主幹形(SCL)およびトリス誘引仕立て(TT)においては, それぞれ, 上記数値の約98%および約97%の値になったことを断わっておきたい.

3. 樹冠形状値の算出

CACOASは毎年の枝葉の空間分布データ, 整枝剪定の記録, 樹形図, 樹冠形図などの多くの数値データや画像データを出力保存した. このうち, 葉量の空間分布データはグリッド内部の立方体ブロックに含まれる葉数を用いた3次元配列変数の形を有し, これがOLEASへの入力データとなった. 一方, CACOASは上記の3次元配列変数を用いて樹冠の積木構造図(ソリッドモデル図)を作図するほか, ブロック1辺長, ブロック底面積およびブロック体積を用いて, それぞれ, 長さ, 面積, 体積に関連する様々な樹冠形状値を算出する機能を有していた. なお, ここで言う樹冠形状値とは樹冠形状の特徴を様々な角度(切り口)から捉えた特性値で, たとえば, 葉を含む立方体ブロックの体積を合計したもの(葉ブロック体積)を近似的に葉層体積と見なしたものである. ただし, 各樹冠形状値は1つの数値(単値データ)からなるものであった.

ところで, 現行のCACOASが算出する樹冠形状値の数はあまり多くはなかったため, 本報では, 新たに追加し, 以下に示す合計107個の樹冠形状値を算出したものである. 107個の樹冠形状値は以下の15種類の範疇から成った. すなわち, 1) 樹の外形寸法とその比, 2) 割り当て空間の中味構成, 3) 葉層と空隙の3方向分布, 4) 樹冠占有面積とLAI, 5) 葉面積密度の分布, 6) 方向別

見た樹冠の平均厚, 7) 1樹当たりの葉量, 8) 方向別葉ブロック連続数, 9) 葉塊の分布, 10) 空隙塊の分布, 11) グリッドにおける方向別透過度, 12) 空隙の分類とその分布, 13) 葉ブロックの部位別分布, 14) 空隙ブロックの部位別分布, 15) 葉ブロックと空ブロックの比率, 16) 樹冠表面に限定した葉ブロックの分布などであった.

合計107個の樹冠形状値の略号と単位については一括して第3表および第4表に記した. ところで, 仕立て方法により割り当て空間の大きさが異なったことから, これに単純に比例する値を樹冠形状値にそのまま用いて比較すれば大きな誤差を伴う. 割り当て空間の大きさが異なっても, グリッド内ブロック総数(21^3)や側面網目数(21^2)は同じである. よって, 上記の恐れのある樹冠形状値については, ブロック数による直接表現, 総網目数に占める該当する網目数の割合(%), あるいは, 割り当て空間体積に占める該当する体積の割合(%)で表現したものである. ただし, 樹冠厚, 樹高, 樹幅, 葉数などはそのままの数値を用いた(第3表および第4表).

以下, 各樹冠形状値の算出方法を列記したものである. これらの算出には, いずれも葉数の空間分布データ(3次元配列変数)を対象にした数個の計算プログラムを自作し, 使用した. これらのプログラムは様々な論理判断を含むループ計算から構成された単純なものであったので, その計算アルゴリズムについては省略した.

1) 樹の外形寸法

1樹を構成する葉ブロック群のうち, 南端, 北端, 東端および西端の葉ブロックを探し, それぞれの位置により, 南北樹幅(TWNS)と東西樹幅(TWEW)を算出した(第1図). また, 上端と下端の葉ブロックを探し, 各位置と地面との距離を算出し, それぞれ, 樹高(TH)および樹冠底部高(HCB)とした(第1図).

2) 割り当て空間の中味構成

葉数が1枚以上のブロックを葉ブロック, 葉数が0および1枚未満のブロックを空隙ブロックと定義した. 第3図に示したように, グリッド全ブロックを葉ブロック, 内部空隙ブロック(葉ブロックに完全に囲まれた空隙ブロック)および外部空隙ブロックの3つに分けた. 葉ブロック数をカウントし, 合計体積を計算し, 葉ブロック体積(VLB)とした. また, 葉ブロック体積が割り当て空間体積(VSS)に占める割合を葉ブロック体積の割合(PVLB)とした. それから, 割り当て空間体積に占める内部空隙ブロック体積および外部空隙ブロック体積の

Table 3 The abbreviations of characteristics of canopy shape and their units except characteristics as a ratio.

Abbreviation	Contents	Units
ASLC	Area of set land compartment	m ²
CVLAD	Coefficient of variation (CV) of leaf area density per leaf block	%
CVNEBA	CV of number of blocks per empty block agglomeration	%
CVNEBEWVC	CV of number of empty blocks per east-west vertical column in a 3D grid	%
CVNEBHVC	CV of number of empty blocks per horizontal column in a 3D grid	%
CVNEBNSVC	CV of number of empty blocks per north-south vertical column in a 3D grid	%
CVNLBA	CV of number of blocks per leaf block agglomeration	%
CVNLEWVC	CV of number of leaves per east-west vertical column in a 3D grid	%
CVNLHC	CV of number of leaves per horizontal column in a 3D grid	%
CVNLNSVC	CV of number of leaves per north-south vertical column in a 3D grid	%
HCB	Height of crown bottom	cm
LAIa	Leaf area index per ASLC	
LAIc	Leaf area index per LAO	
LAO	Land area occupied by a crown	m ²
MAXLAD	Maximum leaf area density per leaf block	cm ⁻¹
MAXNLBA	Maximum number of blocks per leaf block agglomeration	block
MCF45E	Mean continuation frequency of leaf block along down directions with a dip of 45 degree from east in a 3D grid	block
MCF45N	Mean continuation frequency of leaf block along down direction with a dip of 45 degree from north in a 3D grid	block
MCF45S	Mean continuation frequency of leaf block along down direction with a dip of 45 degree from south in a 3D grid	block
MCF45W	Mean continuation frequency of leaf block along down directions with a dip of 45 degree from west in a 3D grid	block
MCFEW	Mean continuation frequency of leaf block along east-west direction in a 3D grid	block
MCFNS	Mean continuation frequency of leaf block along north-south direction in a 3D grid	block
MCFVD	Mean continuation frequency of leaf block along vertical direction in a 3D grid	block
MCT3D	Mean crown thickness along three directions in a 3D grid	cm
MCT45E	Mean crown thickness along down directions from east with a dip of 45 degree in a 3D grid	cm
MCT45N	Mean crown thickness along down directions from north with a dip of 45 degree in a 3D grid	cm
MCT45S	Mean crown thickness along down directions from south with a dip of 45 degree in a 3D grid	cm
MCT45W	Mean crown thickness along down directions from west with a dip of 45 degree in a 3D grid	cm
MCTEW	Mean crown thickness along east-west direction in a 3D grid	cm
MCTNS	Mean crown thickness along north-south direction in a 3D grid	cm
MCTVD	Mean crown thickness along vertical direction in a 3D grid	cm
MLAD	Mean leaf area density per leaf block	cm ⁻¹
MNEB	Mean number of empty blocks per column in a 3D grid	block
MNEBA	Mean number of blocks per empty block agglomeration	block
MNLBA	Mean number of blocks per leaf block agglomeration	block
MNLC	Mean number of leaves per column in a 3D grid	leaf
MVEBA	Mean volume of empty block agglomeration	m ³
MVLBA	Mean volume of leaf block agglomeration	m ³
NEB	Number of empty blocks in a crown	block
NEBA	Number of empty block agglomerations in a crown	
NL	Number of leaves in a crown	leaf
NLB	Number of leaf blocks in a crown	block
NLBA	Number of leaf block agglomerations in a crown	
NLES	Number of leaves in enclosed spaces	leaf
PNLES	Proportion of leaves in enclosed space for total leaves	%
PSLB	Proportion of surface leaf blocks for total leaf blocks	%
PSLBQE	Proportion of surface leaf blocks for total leaf blocks in a quarter part of east side of a 3D grid	%
PSLBQN	Proportion of surface leaf blocks for total leaf blocks in a quarter part of north side of a 3D grid	%
PSLBQS	Proportion of surface leaf blocks for total leaf blocks in a quarter part of south side of a 3D grid	%
PSLBQW	Proportion of surface leaf blocks for total leaf blocks in a quarter part of west side of a 3D grid	%
PVCCS	Proportion of volume of concavity at crown surface for volume of set space (VSS) of a 3D grid	%
PVCCSQE	Proportion of volume of concavity at crown surface for a quarter VSS of east side of a 3D grid	%
PVCCSQN	Proportion of volume of concavity at crown surface for a quarter VSS of north side of a 3D grid	%
PVCCSQS	Proportion of volume of concavity at crown surface for a quarter VSS of south side of a 3D grid	%

Table 4 The continuance of Table 3.

Abbreviation	Contents	Units
PVCCSQW	Proportion of volume of concavity at crown surface for a quarter VSS of west side of a 3D grid	%
PVCEB	Proportion of volume of closed empty blocks within a crown for VSS	%
PVCEBQE	Proportion of volume of closed empty blocks within a crown for a quarter VSS of east side of a 3D grid	%
PVCEBQN	Proportion of volume of closed empty blocks within a crown for a quarter VSS of north side of a 3D grid	%
PVCEBQS	Proportion of volume of closed empty blocks within a crown for a quarter VSS of south side of a 3D grid	%
PVCEBQW	Proportion of volume of closed empty blocks within a crown for a quarter VSS of west side of a 3D grid	%
PVCODQE	Proportion of volume of concavity which opened in the downward (VCOD) for a quarter VSS of east side of a 3D grid	%
PVCODQN	Proportion of VCOD for a quarter VSS of north side of a 3D grid	%
PVCODQS	Proportion of VCOD for a quarter VSS of south side of a 3D grid	%
PVCODQW	Proportion of VCOD for a quarter VSS of west side of a 3D grid	%
PVEBL	Proportion of volume of empty blocks for a third lower part of a 3D grid	%
PVEBM	Proportion of volume of empty blocks for a third middle part of a 3D grid	%
PVEBQE	Proportion of volume of empty blocks for a quarter part of east side of a 3D grid	%
PVEBQN	Proportion of volume of empty blocks for a quarter part of north side of a 3D grid	%
PVEBQS	Proportion of volume of empty blocks for a quarter part of south side of a 3D grid	%
PVEBQW	Proportion of volume of empty blocks for a quarter part of west side of a 3D grid	%
PVEBU	Proportion of volume of empty blocks for a third upper part of a 3D grid	%
PVLB	Proportion of volume of leaf blocks for VSS	%
PVLBL	Proportion of volume of leaf blocks for a third lower part of a 3D grid	%
PVLBM	Proportion of volume of leaf blocks for a third middle part of a 3D grid	%
PVLBQE	Proportion of volume of leaf blocks for a quarter part of east side of a 3D grid	%
PVLBQN	Proportion of volume of leaf blocks for a quarter part of north side of a 3D grid	%
PVLBQS	Proportion of volume of leaf blocks for a quarter part of south side of a 3D grid	%
PVLBQW	Proportion of volume of leaf blocks for a quarter part of west side of a 3D grid	%
PVLBU	Proportion of volume of leaf blocks for a third upper part of a 3D grid	%
PVOEB	Proportion of volume of outer empty blocks except concavity at crown surface for VSS	%
PVOEBQE	PVOEB in a quarter part of east side of a 3D grid	%
PVOEBQN	PVOEB in a quarter part of north side of a 3D grid	%
PVOEBQS	PVOEB in a quarter part of south side of a 3D grid	%
PVOEBQW	PVOEB in a quarter part of west side of a 3D grid	%
RELBL	Ratio of empty block volume to leaf block volume in a third lower part of a 3D grid	
RELBLM	Ratio of empty block volume to leaf block volume in a third middle part of a 3D grid	
RELBLQE	Ratio of empty block volume to leaf block volume in a quarter part of east side of a 3D grid	
RELBLQN	Ratio of empty block volume to leaf block volume in a quarter part of north side of a 3D grid	
RELBLQS	Ratio of empty block volume to leaf block volume in a quarter part of south side of a 3D grid	
RELBLQW	Ratio of empty block volume to leaf block volume in a quarter part of west side of a 3D grid	
RELBLU	Ratio of empty block volume to leaf block volume in a third upper part of a 3D grid	
SDLAD	Standard deviation (SD) of leaf area density per leaf block	cm ⁻¹
SDNEBA	SD of number of blocks per empty block agglomeration	block
SDNLBA	SD of number of blocks per leaf block agglomeration	block
TH	Tree height	cm
TP3D	Transmission proportion along three directions in a 3D grid	%
TP45E	Transmission proportion along down direction with a dip of 45 degree from east in a 3D grid	%
TP45N	Transmission proportion along down direction with a dip of 45 degree from north in a 3D grid	%
TP45S	Transmission proportion along down direction with a dip of 45 degree from south in a 3D grid	%
TP45W	Transmission proportion along down direction with a dip of 45 degree from west in a 3D grid	%
TPEWD	Transmission proportion along east-west direction in a 3D grid	%
TPNSD	Transmission proportion along north-south direction in a 3D grid	%
TPVD	Transmission proportion along vertical direction in a 3D grid	%
TWEW	Tree width in east-west.	cm
TWNS	Tree width in north-south.	cm
VLB	Volume of leaf blocks	m ³
VSS	Volume of set space	m ³

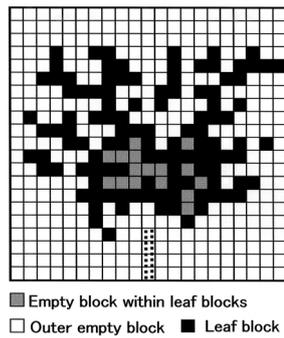


Fig.3 An example of a longitudinal row section in the 3D grid showing leaf blocks, empty blocks within leaf blocks and outer empty blocks.

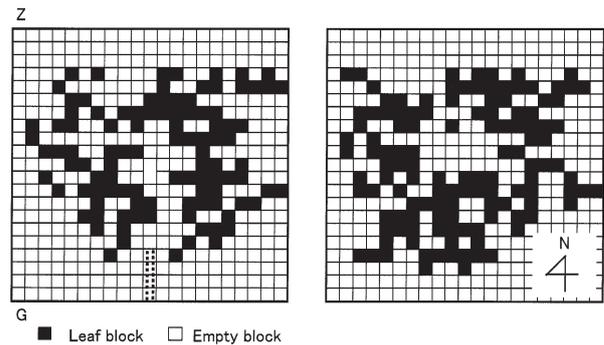


Fig.4 Distribution of leaf blocks and empty blocks on a longitudinal section of rows in the 3d grid (left) and that on a cross section of stairs in the 3D grid (right). The numbers of leaf blocks or empty blocks were counted on all rows (north-south rows or east-west rows) and on all stairs to investigate MNLC, CVNLNSVC, CVNLEWVC, CVNLHC, MNEB, CVNEBNSVC, CVNEBEWVC and CVNEBHC.

割合を算出し、それぞれ、内部空隙体積割合 (PVCEB) および外部空隙体積割合 (PVOEB) とした。

3) 葉層と空隙の3方向分布

第4図右にグリッド1段、第4図左にグリッド1列の葉ブロックと空隙ブロックの分布例を示した。グリッドの段ごとおよび列ごとの葉数を算出し、これを全段、南北列の全列および東西列の全列について繰り返し、それぞれ、段当たり平均葉数、南北列当たり平均葉数および東西列当たり平均葉数を算出した。また、この3者を平均して列段当たり葉数の平均値 (MNLC) とした。その上、グリッドの段ごと、南北列ごとおよび東西列ごとの葉数の変動係数を算出し、それぞれ、段葉数変動係数 (CVNLHC)、南北列葉数変動係数 (CVNLNSVC) および東西列葉数変動係数 (CVNLEWVC) とした。

グリッドの段当たり平均空隙ブロック数、南北列当たり平均空隙ブロック数および東西列当たり平均空隙ブロック数を算出したうえで、この3者を平均して列段当たり空隙ブロック数の平均値 (MNEB) とした。また、これらのデータを用いて、グリッドの段ごと、南北列ごとおよび東西列ごとの空隙ブロック数の変動係数を算出し、それぞれ、段空隙ブロック数変動係数 (CVNEBHC)、南北列空隙ブロック数変動係数 (CVNEBNSVC) および東西列空隙ブロック数変動係数 (CVNEBEWVC) とした。

4) 樹冠占有面積とLAI

第5図左はグリッド底面に投影された樹冠葉層 (枝も含む) の画像を示したものである。グリッド底面の各網

目に含まれる葉数を合計し、合計葉数が1枚以上の網目数を算出し、土地面積に変換して樹冠占有面積 (LAO) とした。グリッド内の総葉数に個葉面積を乗じて総葉面積を算出し、これを樹冠占有面積 (LAO) で割り、樹冠占有面積当たり葉面積指数 (LAIc) とした。上記総葉面積を割り当て土地区画面積 (ASLC) で割り、割り当て土地区画面積当たり葉面積指数 (LAIa) とした。さらに、上記総葉面積を樹間距離と樹列間距離からなる土地面積で割り、園地当たりの葉面積指数 (LAIo) とした。

5) 葉面積密度の分布

上述のごとく、葉を1枚以上含むブロックを葉ブロック (第6図) と定義したが、葉ブロック中に含まれる葉数と個葉平均面積から葉ブロック単位の葉面積密度データを入手し、これをグリッド内全葉ブロックについて平均し、葉ブロックの平均葉面積密度 (MLAD) とした。さらに、同データから葉ブロックの葉面積密度の最大値 (MAXLAD)、標準偏差 (SDLAD) および変動係数 (CVLAD) も算出した。既に記したように葉数が0および1枚未満のブロックを空隙ブロック (第6図) と定義したため、上記の葉面積密度の計算には葉数が0および1枚未満のデータは用いなかった。よって、本報における葉面積密度に関連した数値データ名には必ず「葉ブロック」の用語を付したことを断わっておく。

6) 方向別に見た樹冠の平均厚

1) に記した樹の外形状 (樹幅、樹高など) は各方向における最も外側の僅か2個の葉ブロック位置を用いて算出したものであった。したがって、この両葉プロ

クを除いた部分の中味とは無関係になり、実質的な樹冠葉層の厚さを代表しがたい。そこで、実質的な葉層の厚さを入手するため、グリッド内1本の縦ブロック柱における最上部葉ブロックと最下部葉ブロックの距離を算出した（たとえば第7図左のd1とd2）。これをグリッド内全ての縦ブロック柱について繰り返し、全ての距離を平均し、上下厚平均値（MCTV）とした。また、グリッド内1本の南北方向横ブロック柱における最南部葉ブロックと最北部葉ブロックの距離を算出した（たとえば第7図右のd5）。これをグリッド内全ての南北方向横ブロック柱について繰り返し、全ての距離を平均し、南北厚平均値（MCTNS）とした。さらに、グリッドの東西方向横ブロック柱についても上記同様な計算処理を行い（たとえば第7図右のd6）、東西厚平均値（MCTEW）を算出した。その上、上記3者を平均し、3方向厚平均値（MCT3D）とした。

上記はグリッド3軸に平行な樹冠の厚さの計測であった。しかし、斜め上から差し込む光の減衰にとって斜め方向の樹冠の厚さも無視できない。そこで、4つの方角における45度下向きに傾きに限定し、樹冠の厚さを計算した。すなわち、グリッド南側面と上面の各網目から階段を降りるようにして葉ブロックの最南列と最北列を見出し、両列間の距離を算出し、 $2^{0.5}$ を乗じ、南斜方向の厚さとした（たとえば、第7図左のd3）。そして、この計算を関連する全ての網目について繰り返して得た距離を平均し、南斜方向の厚さの平均値（MCT45S）とした。北斜方向、東斜方向および西斜方向についても上記同様な計算処理を行い、それぞれ、北斜方向厚さの平均値（MCT45N）、東斜方向厚さの平均値（MCT45E）および西斜方向厚さの平均値（MCT45W）を算出した。

7) 1樹当たりの葉量

葉量に関連した樹冠形状値として、1樹の総葉数（NL）と閉鎖空間内葉数（NLES）を算出した。後者については、個々の葉ブロックを出発点として、グリッドの上下、南北および東西の合計6方向に走査し、6方向全てにおいて葉ブロックに突き当たる場合のみ、出発点となった葉ブロックを閉鎖空間内葉ブロックと見なした。また、全ての閉鎖空間内葉ブロックに含まれる合計葉数を閉鎖空間内総葉数（NLES）とした。それから、1樹の総葉数（NL）に対する閉鎖空間内葉数（NLES）の割合を算出し、閉鎖空間内葉数割合（PNLES）とした。このほか1樹の葉ブロック数（NLB）、割り当て空間体積に対する

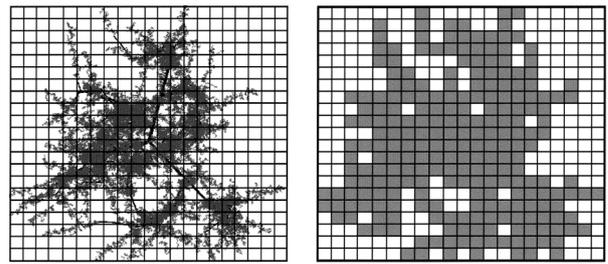


Fig.5 A schema of calculation of land area occupied by a crown (LAO). A projected plan of a tree crown with the ground direction on the stair network in the 3D grid (left). The total number of squares on the stair network where projected leaves exists was counted to calculate LAO (right).

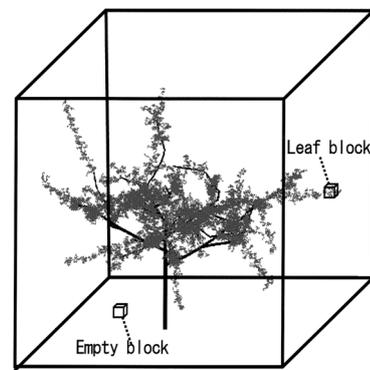


Fig.6 Data of number of leaves within 9261 blocks from CACOAS were given by three-dimensional array. Leaf area densities (LADs) were calculated using number of leaves in each leaf block and the mean area of the individual blade. Data of LAD were used to calculate the mean (MLAD), the maximum (MAXLAD), the standard deviation (SDLAD) and the coefficient of variation (CVLAD).

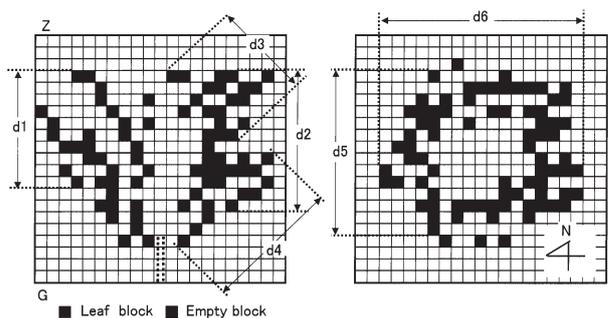


Fig.7 In a longitudinal section of rows in the 3D grid (left), d1 and d2 indicate vertical thickness, and d3 and d4 indicate thickness along down direction with a dip of 45 degree. In a cross section of stairs in the 3D grid (right), d5 indicates thickness along north-south direction, and d6 indicates thickness along east-west direction. These calculations were repeated in all longitudinal sections of rows, all cross sections of stairs, and all down directions with a dip of 45 degree to obtain the several mean thickness along several directions in the 3D grid. G and Z indicates the ground and the zenith, respectively.

葉ブロック体積の割合 (PVLB) および空隙ブロック数 (NEB) も算出した。

8) 方向別葉ブロック連続数

6) の方向別に捉えた樹冠の平均厚は、ある方向に沿った1本のブロック柱における最も外側に存在する2つの葉ブロック間の距離を全ブロック柱について平均したので、その途中における空隙ブロックの存在とは無関係であった。そこで、葉層の連続性を示す樹冠形状値を入手するため、方向別に葉ブロック連続数をカウントし、平均した。すなわち、グリッド南端の各網目から伸びる1本の横ブロック柱の中を北に向けて水平に走査し、葉ブロック連続数をカウントし、網目ごと集計した。この集計値を関連する全網目について平均し、南北方向葉ブロック連続数の平均値 (MCFNS) とした (第8図右)。この場合、葉ブロックの連続がブロック柱の途中でいったん切れ、再び連続したときの葉ブロック連続数については別データとし、平均値に反映させた。同様に、グリッド東端の各網目から西に向けて横ブロック柱を走査し (第8図右)、あるいは、グリッド上端の各網目から地面に向けて縦ブロック柱を走査しながら (第8図左)、葉ブロック連続数をカウントし、上記同様な計算処理を行い、それぞれ、東西方向葉ブロック連続数の平均値 (MCFEW) あるいは上下方向葉ブロック連続数の平均値 (MCFVD) を算出した。

次に、4方角における斜め45度下向きの方向に沿った葉ブロック連続数を計算した。すなわち、グリッド南端網目とグリッド上端網目の両者から階段を降りるようにして葉ブロック連続数をカウントし (第8図左)、関連する全網目の連続数を平均したものを南から斜下方向葉ブロック連続数の平均値 (MCF45S) とした。さらに、北から斜下方向、東から斜下方向および西から斜下方向について、上記同様な計算処理を行い、それぞれ、北から斜下方向葉ブロック連続数の平均値 (MCF45N)、東から斜下方向葉ブロック連続数の平均値 (MCF45E) および西から斜下方向葉ブロック連続数の平均値 (MCF45W) を算出した。

9) 葉塊

8) の方向別葉ブロック連続数は1方向に沿った葉ブロックの連続数であった。けれども、葉ブロックの隣接は1方向にとどまらず、2方向あるいは3方向にも同時に隣接し、多数の葉ブロックが集合することで塊状を呈する場合がある。葉ブロックがこのように隣接集合した

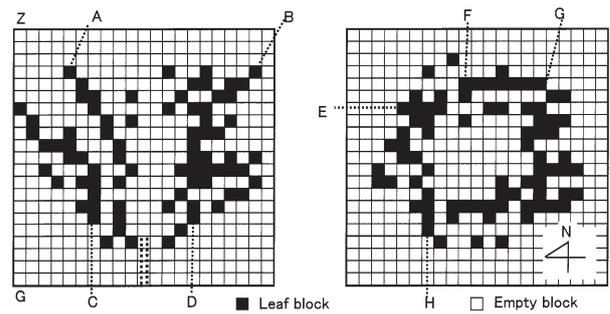


Fig.8 Typical description of continuation frequency of leaf blocks in a longitudinal section of rows in the 3D grid (left) and that in a cross section of stairs in the 3D grid (right). A and B: Three leaf blocks continued along down direction with a dip of 45 degree. C: Five leaf blocks continued along vertical direction. D: Two leaf blocks continued along vertical direction. E: Four leaf blocks continued along east-west direction. F: Two leaf blocks continued along north-south direction. G: Seven leaf blocks continued along east-west direction. H: Four leaf blocks continued along north-south direction. G and Z in the left side indicates the ground and the zenith, respectively.

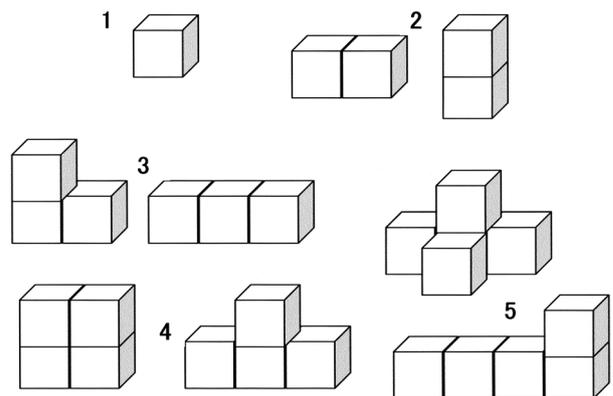


Fig.9 Several patterns of adjacency of leaf blocks or empty blocks. The numerals indicate numbers of the blocks.

ものを葉塊と定義した (第9図)。葉塊の大きさを示す樹冠形状値を入手するため、任意の葉ブロックを出発点として、その上下方向、南北方向および東西方向に葉ブロックが隣接しているかどうか走査し、隣接した葉ブロック数を加算しながら各方向において隣接しないところまで走査を継続した。この走査が終了した時点で、葉ブロック数加算値をその葉塊の葉ブロック数とした。この場合、葉ブロック数加算処理に既に使用された葉ブロックを避けながら (重複計算を避けながら)、他の葉ブロックについて上記同様に走査し、グリッド内全ての葉塊のデータを入手したうえで、1樹の葉塊数 (NLBA)、葉塊当たり葉ブロック数の平均値 (MNLBA)、最大値 (MAXNLBA)、

標準偏差 (SDNLBA) および変動係数 (CVNLBA) ならびに葉塊の平均体積 (MVLBA) を算出した。

10) 空隙塊

空隙ブロックが隣接集合したものを空隙塊と定義し、空隙塊の大きさを示す樹冠形状値を入手するため、任意の空隙ブロックを出発点として、9)の葉塊の場合と同様な計算処理を行った。グリッド内全ての空隙塊のデータを入手したうえで、1樹の空隙塊数 (NEBA)、空隙塊当たり空隙ブロック数の平均値 (MNEBA)、標準偏差 (SDNEBA) および変動係数 (CVNEBA) ならびに空隙塊の平均体積 (MVEBA) を算出した。

11) グリッドの方向別透過度

樹冠を様々な角度から眺めたとき、透けて見える部分がある。透けて見える部分はその視線上に葉層が存在しないためである。そこで、樹冠の透過度を示す樹冠形状値を入手するため、グリッド南端網目から北端網目に至るまで葉ブロックが存在しない網目数をカウントし (第10図右)、全網目数に占める割合を南北方向透過度 (TPNSD) とした。さらに、グリッド東端網目から西端網目まで (第10図右) および上端網目から下端網目まで (第10図左)、上記同様な計算処理を行い、それぞれ、東西方向透過度 (TPEWD) および上下方向透過度 (TPVD) を算出した。また、上記3者を平均し、3方向透過度 (TP3D) とした。

次に、4方角斜め45度下向き方向の透過度を算出した。この場合、グリッドの上端網目と南端網目の両者から階段を降りるようにして、グリッド境界まで葉ブロックが存在しない網目数をカウントし (第10図左)、両網目総数に占める割合を南45度下方の透過度 (TP45S) とした。さらに、グリッドの上端網目と北端網目の両者、上端網目と東端網目の両者および上端網目と西端網目の両者から階段を降りるようにして、上記同様な計算処理を行い、それぞれ、北45度下方の透過度 (TP45N)、東45度下方の透過度 (TP45E) および西45度下方の透過度 (TP45W) を算出した。

12) 空隙の分類とその部位別分布

2)に記した外部空隙を、樹冠表面の凹凸で生じる樹冠表面陥没空隙とこれ以外の空隙 (純外部空隙) の2つに分けた。樹冠表面陥没体積の算出のために、グリッドを構成する個々の空隙ブロックについて以下の陥没判定を行った。すなわち、グリッド内任意の1つの空隙ブロックを出発点として、その上下方向、南北方向および

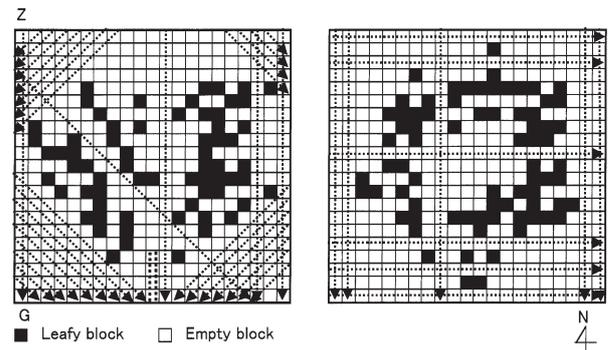


Fig.10 In a longitudinal section of rows in the 3D grid (left), the oblique arrows and downward ones show transmissions along down direction with a dip of 45 degree and that along vertical direction, respectively. In a cross section of stairs of the 3D grid (right), downward arrows and lateral ones show transmissions along north-south direction and that along east-west direction, respectively.

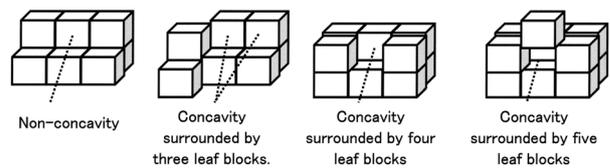


Fig.11 Classification of concavity at a crown surface using number of leaf blocks, which surrounded a concavity.

東西方向に走査しながら葉ブロックに突き当たるかどうか判定し、次のいずれかのケースに該当するとき、出発点であった空隙ブロックを樹冠表面陥没空隙ブロックとした。ケース1: 南北東西のいずれの方向にも突き当たり、かつ上下のいずれか1方向に突き当たる。ケース2: 南北上下のいずれの方向にも突き当たり、かつ東西方向のいずれか1方向に突き当たる。ケース3: 東西上下のいずれの方向にも突き当たり、かつ南北方向のいずれか1方向に突き当たる。なお、種々のタイプの陥没例については第11図を参照されたい。一方、全方向とも突き当たる場合は内部空隙とした。また、上記2種類の空隙のいずれにも属しない空隙を純外部空隙とした。出発点になる他の空隙ブロックの一つ一つについても重複しないように上記同様に走査し、グリッド内全ての空隙ブロックを分類し、これらの空間位置 (分布データ) を記憶した。その上、上記走査と並行して、陥没の開口部が下を向く陥没空隙 (以下、下向き陥没空隙) についても別途記憶した。最後に、分類された各空隙ブロックの合計体積が割り当て空間体積に占める割合を算出し、樹冠

表面陥没空隙体積割合 (PVCCS), 内部空隙体積割合 (PVCEB) および純外部空隙体積割合を求めた.

次に, 樹冠表面陥没空隙の分布データを元に, グリッドを東西南北の三角柱に分け (第12図左), 各方向別三角柱体積に占める樹冠表面陥没空隙体積の割合 (PVCCSQS, PVCCSQN, PVCCSQE および PVCCSQW) も算出した. 加えて, 各方向別三角柱体積に占める下向き陥没空隙体積の割合 (PVCODQS, PVCODQN, PVCODQE および PVCODQW) も算出した.

ところで, 内部空隙については以下の集計を行った. すなわち, 内部空隙の分布データを元に, 各三角柱 (第12図左) の体積に占めるそれぞれの内部空隙体積の割合 (PVCEBQS, PVCEBQN, PVCEBQE および PVCEBQW) を算出した. このほか, 純外部空隙の分布データを元に, 各三角柱 (第12図左) の体積に占める純外部空間体積の割合 (PVOEBQS, PVOEBQN, PVOEBQE および PVOEBQW) も算出した.

13) 葉ブロックの部位別分布

グリッド部位別の葉層分布を示す樹冠形状値を入手するため, グリッドを上中下の3つの四角柱 (第12図右), あるいは, 東西南北の4つの三角柱に分け (第12図左), それぞれに含まれる葉ブロック数が各領域を構成するブロック数に占める割合を算出した. すなわち, 上部葉ブロック体積割合 (PVLBU), 中間部葉ブロック体積割合 (PVLBM) および下部葉ブロック体積割合 (PVLBL), あるいは, 南側葉ブロック体積割合 (PVLBQS), 北側葉ブロック体積割合 (PVLBQN), 東側葉ブロック体積割合 (PVLBQE) および西側葉ブロック体積割合 (PVLBQW) を算出した.

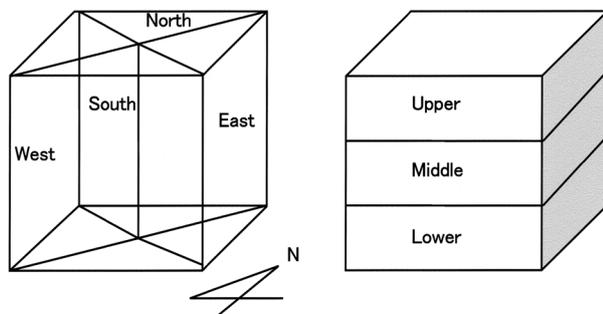


Fig.12 The four regions divided in four directions in the 3D grid (left) and the three regions divided in the longitudinal direction (right).

14) 空隙ブロックの部位別分布

次に, 空隙のグリッド部位別分布を示す樹冠形状値を入手するため, 13) の葉ブロックの部位別分布と同様な計算処理を空隙ブロックについて行い, 上部空隙ブロック体積割合 (PVEBU), 中間部空隙ブロック体積割合 (PVEBM), 下部空隙ブロック体積割合 (PVEBL), 南側空隙ブロック体積割合 (PVEBQS), 北側空隙ブロック体積割合 (PVEBQN), 東側空隙ブロック体積割合 (PVEBQE) および西側空隙ブロック体積割合 (PVEBQW) を算出した.

15) 葉ブロックと空隙ブロックの比率

葉層に対する空隙の存在比を示す樹冠形状値を入手するため, 13) の葉ブロック数に対する 14) の空隙ブロック数の比 (以下, 空葉比) を算出した. この場合, グリッドを上中下の3つの四角柱 (第12図右), あるいは, 東西南北の4つの三角柱に分け (第12図左), それぞれの領域における空葉比として, 上部空葉比 (REBLBU), 中間部空葉比 (REBLBM) および下部空葉比 (RELBL), あるいは, 南側空葉比 (REBLBQS), 北側空葉比 (REBLBQN), 東側空葉比 (REBLBQE) および西側空葉比 (REBLBQW) を算出した.

16) 樹冠表面の葉ブロック分布

樹冠全体の葉層に占める樹冠表面の葉層 (第13図) の割合を示す樹冠形状値を入手するため, 以下の計算処理を行った. すなわち, グリッドの南端, 北端, 東端, 西端および上端の各網目から, それぞれ, 南から北, 北から南, 東から西, 西から東および上から下の5方向に走査し, 同一の網目において最初に突き当たった葉ブロックのみを樹冠表面葉ブロックとした. この場合, 主要な

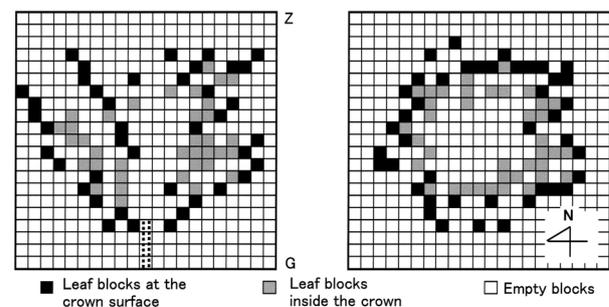


Fig.13 Schemas of leaf blocks. A longitudinal section of rows in the 3D grid (left), and a cross section of stairs in the 3D grid (right).

光が入射する表面に限定し、極めて弱い光しか入射しない下から上の方向については走査しなかった。5方向からの走査を完了した時点でグリッド内全葉ブロック数に占める樹冠表面葉ブロック数の割合を計算し、樹冠表面葉ブロック数割合（PSLB）とした。

次に、樹冠表面葉ブロックの分布データを元に、グリッドの東西南北4つの三角柱(第12図左)に属する葉ブロック数に占める各領域の樹冠表面葉ブロック数の割合を算出し、南側表面葉ブロック数割合（PSLBQS）、北側表面葉ブロック数割合（PSLBQN）、東側表面葉ブロック数割合（PSLBQE）および西側表面葉ブロック数割合（PSLBQW）とした。

4. 統計処理および多変量解析

平均値比較（t分布検定）とTukeyの平均値多重比較にはPC用統計ソフトウェア（Excel 統計, エスミ）を用いた。因子分析, 重回帰分析および主成分分析にはPC用統計ソフトウェア（Excel 多変量解析, エスミ）を用いた。

結 果

1. 118園地における光環境の変動範囲

118園地の樹齢10, 15および20年の晴天日平均葉面PPFD (CDMPPFD)と曇天日平均葉面PPFD (ODMPPFD)を第14図に示した。通常、樹齢の英語表現に、たとえば、樹齢15年の樹には“15 years old tree”を用いるが、ここでは樹齢15年目のシミュレーション実験結果という別の意味があるので、本論文の図表およびSummaryの中では“15-year of tree age”のように表現したことを断わっておく。第14図において、数値の園地差を読み取れるように横軸目盛を拡大表示したが、ほぼ同一のLAIoにもかかわらず、樹齢, 仕立て方法, 個々の樹（園地）などの違いによりCDMPPFDやODMPPFDに相当な違いが見出された。樹齢15年に限り日中13個の時刻ごと、晴天日毎時平均葉面PPFD (CHMPPFD) および曇天日毎時平均葉面PPFD (OHMPPFD) の118園地における最大値, 最小値, 平均値, 標準偏差, 変動係数および最

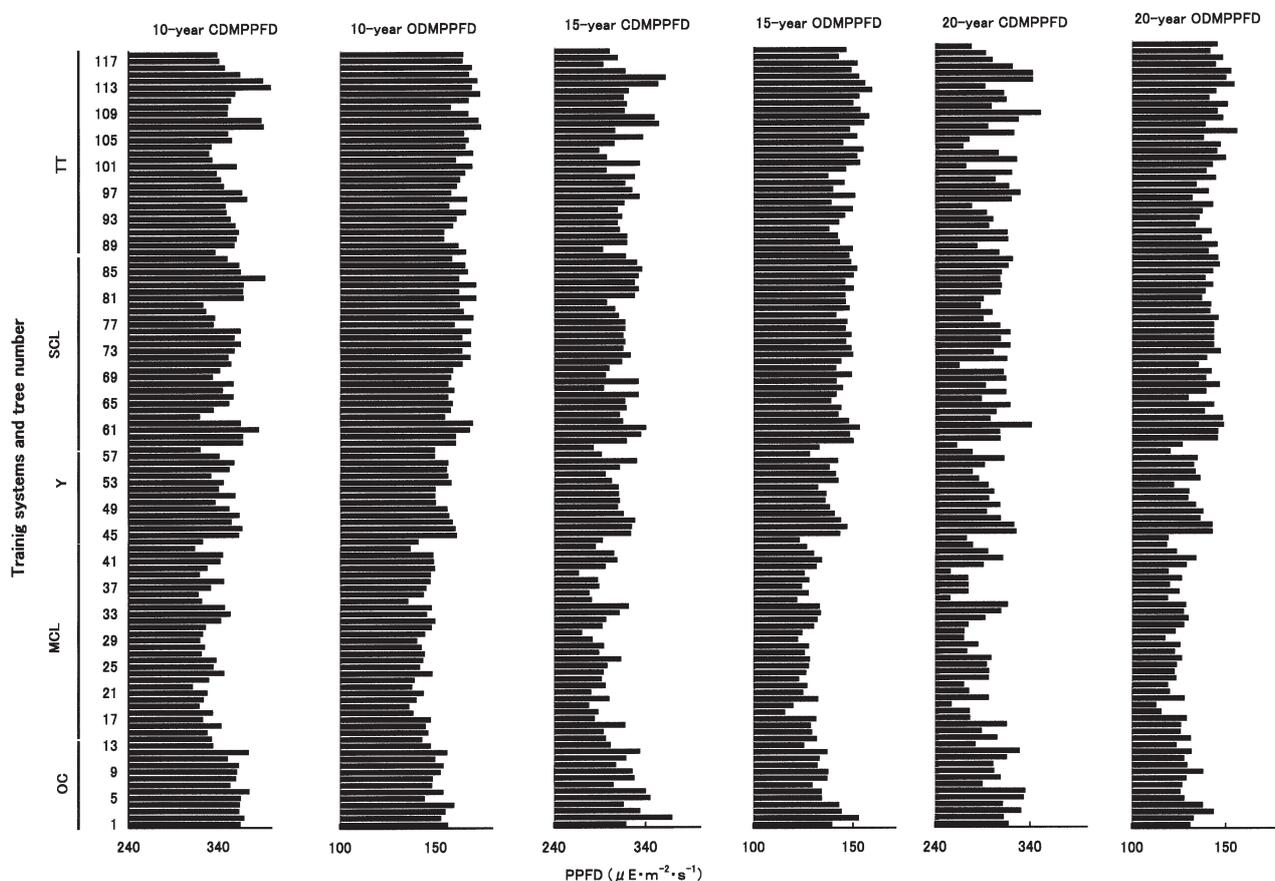


Fig. 14 CDMPPFDs and ODMPPFDs of the 118 orchards in the end of July in the 10-, 15- and 20-year of tree age.

大差の割合 (= (最大値 - 最小値) / 平均値 × 100%) を第5表に示した。HMPPFDの変動係数は小さかったが(約6%~約10%, 第5表), 118園地の中にはやや極端なHMPPFDも現れ, HMPPFDの最大差の割合は約28~約44%であった(第5表)。

4つの樹齢ごと, 118園地におけるCDMPPFDおよびODMPPFDの最大値, 最小値, 平均値, 標準偏差, 変動係数および最大差の割合を第6表に示した。葉量の少ない樹齢5年とこれ以降の3つの樹齢との間には光環境の大きな違いが認められた(第6表)。また, 樹齢10年以降, 樹齢の上昇に伴い設定園地LAIが漸増したため, DMPPFDは漸減した(第6表)。樹齢10, 15および20年のCDMPPFDおよびODMPPFDの118園地における変動係数は, それぞれ, 5.4~6.7%および6.3~7.2%の範囲にあり(第6表), 毎時平均値の変動係数(第5表)に比べやや減少した。また, これら数値の最大差の割合は, それぞれ, 25.1~32.9%および24.6~32%の範囲にあっ

た(第6表)。

2. 118園地における光環境の天候間および樹齢間の単相関と順位相関

4つの樹齢におけるCDMPPFDおよびODMPPFDのデータを用いて総当たり相関行列を算出し, 第7表に示した。同一樹齢でも異なる天候の間, つまり, CDMPPFDとODMPPFDの間の相関はさほど高くはなかった(第7表)。次に, 異なる樹齢間の相関を見ると, 樹齢5年と10年以降の3つの樹齢との間の相関係数は全体に大きく減少し, 特に晴天日どうしの相関係数は0.4付近に留まり, 曇天日どうしの相関係数は0.65付近であった(第7表)。樹齢10年以降, 異なる樹齢間の相関は同一天候の場合には全体的に高く, 相関係数は0.78~0.94の範囲にあったが, 異なる天候の場合には, これよりも減少した(第7表)。

ところで, DMPPFDの数値データの代わりに, この序列データを用いることで, 仕立て方法と整枝剪定パラ

Table 5 Maximum (MAX), minimum (MIN), mean (M), standard deviation (SD), coefficient of variation (CV, %) and proportion of the largest difference (PLD, (MAX-MIN) / M × 100%) of CHMPPFD and OHMPPFD of the 118 orchards in the end of July in the 15-years of tree year. The unit was $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.

	MAX	MIN	M	SD	CV	PLD ²
C6HMPPFD	69.4	50.4	59.0	4.2	7.1	32.2
C7HMPPFD	150.1	112.4	131.4	9.2	7.0	28.7
C8HMPPFD	288.3	200.5	243.8	23.7	9.7	36.0
C9HMPPFD	386.5	264.0	320.8	26.7	8.3	38.2
C10HMPPFD	520.9	360.4	425.9	31.9	7.5	37.7
C11HMPPFD	675.5	437.5	537.6	41.2	7.7	44.3
C12HMPPFD	730.9	478.1	584.6	45.8	7.8	43.2
C13HMPPFD	672.1	456.5	541.4	37.2	6.9	39.8
C14HMPPFD	510.6	363.3	430.7	27.6	6.4	34.2
C15HMPPFD	392.3	268.2	324.4	24.5	7.6	38.3
C16HMPPFD	285.6	204.4	243.2	22.0	9.0	33.4
C17HMPPFD	151.5	113.5	131.4	9.0	6.9	29.0
C18HMPPFD	68.3	50.7	59.1	3.9	6.6	29.8
O6HMPPFD	41.5	29.4	35.1	2.7	7.6	34.5
O7HMPPFD	122.5	88.6	104.1	6.6	6.3	32.6
O8HMPPFD	142.8	94.2	118.6	9.1	7.7	41.0
O9HMPPFD	155.1	108.2	128.7	9.2	7.2	36.5
O10HMPPFD	186.7	128.8	159.9	13.5	8.5	36.2
O11HMPPFD	278.9	187.0	233.8	21.8	9.3	39.3
O12HMPPFD	312.5	203.9	255.6	24.8	9.7	42.5
O13HMPPFD	280.9	185.0	232.8	22.0	9.5	41.2
O14HMPPFD	187.2	125.9	158.2	14.2	9.0	38.8
O15HMPPFD	151.4	104.2	126.3	10.1	8.0	37.4
O16HMPPFD	147.7	96.4	119.1	10.2	8.6	43.1
O17HMPPFD	121.1	90.2	104.4	6.4	6.2	29.6
O18HMPPFD	40.9	30.7	35.5	2.2	6.1	28.6

²Unit:%

Table 6 Maximum, minimum, mean, standard deviation, coefficient of variation and proportion of the largest difference of CDMPPFD and ODMPPFD of the 118 orchards in the end of July in the 5-, the 10-, the 15- and the 20-year of tree year. The abbreviations and the units refer to Table 5.

Tree age		MAX	MIN	M	SD	CV	PLD
5-year	CDMPPFD	598.0	541.7	563.6	13.2	2.4	10.0
10-year	CDMPPFD	397.2	310.2	347.0	18.6	5.4	25.1
15-year	CDMPPFD	367.5	265.4	310.3	19.1	6.2	32.9
20-year	CDMPPFD	349.6	254.3	299.2	20.1	6.7	31.9
5-year	ODMPPFD	255.8	187.6	222.3	18.2	8.2	30.7
10-year	ODMPPFD	173.1	134.8	155.6	9.8	6.3	24.6
15-year	ODMPPFD	158.8	115.1	139.4	9.9	7.1	31.3
20-year	ODMPPFD	155.3	112.1	134.8	9.8	7.2	32.0

Table 7 Coefficients of correlation between CDMPPFDs and ODMPPFDs of the four tree ages. Significance levels were as follow; $r > 0.321$ ($P < 0.001$), $r > 0.254$ ($P < 0.01$) and $r > 0.195$ ($P < 0.05$).

Tree age	5-year CDMPPFD	5-year ODMPPFD	10-year CDMPPFD	10-year ODMPPFD	15-year CDMPPFD	15-year ODMPPFD	20-year CDMPPFD	20-year ODMPPFD	
5-year	CDMPPFD	1.0000							
5-year	ODMPPFD	0.0093	1.0000						
10-year	CDMPPFD	0.4561	0.1264	1.0000					
10-year	ODMPPFD	0.1743	0.6830	0.6067	1.0000				
15-year	CDMPPFD	0.4142	0.1684	0.8484	0.5559	1.0000			
15-year	ODMPPFD	0.2075	0.6502	0.6089	0.9154	0.6330	1.0000		
20-year	CDMPPFD	0.3865	0.1462	0.7860	0.4806	0.8525	0.5489	1.0000	
20-year	ODMPPFD	0.2066	0.6598	0.5644	0.9038	0.5789	0.9439	0.5389	1.0000

Table 8 The orders of CDMPPFD and ODMPPFD of the 118 orchards in the four tree ages.

Tree age										Tree age									
5-year		10-year		15-year		20-year				5-year		10-year		15-year		20-year			
Tree No.	Training	CDMPPFD	ODMPPFD	CDMPPFD	ODMPPFD	CDMPPFD	ODMPPFD	CDMPPFD	ODMPPFD	Tree No.	Training	CDMPPFD	ODMPPFD	CDMPPFD	ODMPPFD	CDMPPFD	ODMPPFD	CDMPPFD	ODMPPFD
1	OC	24	107	23	64	39	67	23	76	60	SCL	4	41	15	44	11	30	51	17
2	OC	10	93	10	76	1	10	36	71	61	SCL	1	3	6	16	7	8	4	7
3	OC	6	84	26	70	12	47	7	28	62	SCL	2	4	21	9	56	33	66	10
4	OC	17	74	25	48	51	53	38	57	63	SCL	11	7	114	71	63	56	55	53
5	OC	30	118	19	102	6	80	6	87	64	SCL	12	8	86	59	38	48	21	29
6	OC	36	117	7	75	8	81	5	97	65	SCL	18	30	54	52	48	69	88	79
7	OC	37	112	51	90	78	95	86	92	66	SCL	19	31	43	62	18	60	32	48
8	OC	38	113	35	88	26	75	43	83	67	SCL	20	32	70	49	95	46	79	14
9	OC	35	111	32	77	27	73	57	55	68	SCL	21	33	44	63	19	61	33	49
10	OC	14	110	29	74	73	88	59	81	69	SCL	46	1	90	57	90	24	37	38
11	OC	31	102	58	81	40	83	29	88	70	SCL	47	2	75	50	82	63	114	64
12	OC	32	103	8	67	13	76	9	74	71	SCL	39	5	48	32	58	49	28	46
13	OC	33	108	88	94	80	109	93	101	72	SCL	40	6	55	15	31	21	60	11
14	OC	34	109	92	107	89	90	54	75	73	SCL	7	26	39	33	54	26	19	30
15	MCL	90	89	98	97	97	96	87	96	74	SCL	5	25	18	14	45	38	44	26
16	MCL	91	90	71	100	44	97	30	95	75	SCL	8	27	40	34	55	27	20	31
17	MCL	64	91	106	93	110	92	99	82	76	SCL	9	28	22	13	43	40	49	27
18	MCL	65	92	89	114	107	118	100	117	77	SCL	72	13	85	47	47	35	85	15
19	MCL	70	104	115	117	116	117	116	118	78	SCL	73	14	84	7	66	62	63	42
20	MCL	71	105	104	112	83	86	71	86	79	SCL	78	11	101	29	75	31	89	40
21	MCL	58	67	100	105	114	110	102	109	80	SCL	79	12	105	36	86	39	84	59
22	MCL	59	68	118	115	91	104	112	113	81	SCL	26	47	11	5	24	41	46	51
23	MCL	83	94	97	113	102	114	70	103	82	SCL	27	48	13	38	16	17	40	32
24	MCL	84	95	65	89	96	106	67	106	83	SCL	28	49	12	6	25	42	47	52
25	MCL	54	100	87	109	84	102	77	102	84	SCL	29	50	2	37	17	18	41	33
26	MCL	55	101	81	106	59	99	65	93	85	SCL	66	9	20	21	10	15	24	13
27	MCL	106	96	110	103	106	107	107	105	86	SCL	67	10	28	26	20	28	15	16
28	MCL	107	97	103	108	94	101	91	98	87	SCL	99	17	60	54	41	32	52	45
29	MCL	68	71	112	111	112	115	111	116	88	SCL	100	18	83	24	99	23	92	21
30	MCL	69	72	107	101	117	111	110	104	89	TT	50	61	41	39	36	52	25	60
31	MCL	87	59	102	92	101	94	104	89	90	TT	51	62	34	72	34	59	27	39
32	MCL	98	57	73	79	88	89	80	78	91	TT	60	63	31	73	61	72	69	69
33	MCL	80	87	50	98	64	82	42	90	92	TT	61	64	37	51	70	54	61	63
34	MCL	81	88	64	91	32	84	26	85	93	TT	104	21	49	42	57	43	75	58
35	MCL	76	81	109	118	113	116	118	114	94	TT	105	22	61	23	71	22	97	34
36	MCL	77	82	116	104	115	103	103	99	95	TT	112	19	62	60	50	68	18	73
37	MCL	114	65	95	99	104	112	105	110	96	TT	113	20	9	22	15	16	8	44
38	MCL	115	66	66	96	108	100	106	94	97	TT	62	55	16	56	28	66	22	66
39	MCL	101	58	113	95	118	108	117	112	98	TT	63	56	67	40	46	44	56	24
40	MCL	118	60	99	82	92	91	83	84	99	TT	96	53	72	35	23	74	17	47
41	MCL	94	98	74	86	72	79	39	67	100	TT	97	54	80	27	87	37	109	35
42	MCL	95	99	69	87	77	93	74	100	101	TT	92	23	33	10	14	7	11	6
43	MCL	116	69	117	116	109	105	94	115	102	TT	93	24	91	45	85	14	53	22
44	MCL	117	70	108	110	100	113	108	111	103	TT	88	15	96	8	105	5	113	12
45	YS	22	75	30	41	30	51	12	36	104	TT	89	16	93	25	76	45	101	54
46	YS	23	73	17	46	29	34	14	37	105	TT	108	38	45	19	9	13	13	1
47	YS	42	114	46	53	22	50	45	61	106	TT	109	39	57	28	74	29	72	50
48	YS	43	115	27	61	53	65	76	56	107	TT	45	44	3	1	3	4	10	9
49	YS	44	116	53	68	69	70	50	68	108	TT	48	45	5	3	5	2	1	19
50	YS	41	83	82	78	62	78	68	80	109	TT	49	46	59	20	49	6	64	4
51	YS	15	79	38	83	65	77	58	77	110	TT	82	29	56	58	35	20	31	43
52	YS	16	80	78	80	67	87	73	107	111	TT	110	36	47	18	52	9	35	23
53	YS	85	85	68	55	79	57	90	62	112	TT	111	37	36	2	33	1	81	2
54	YS	86	86	94	66	93	64	95	70	113	TT	56	51	1	11	4	3	2	5
55	YS	13	106	52	69	60	71	82	72	114	TT	57	52	4	4	2	11	3	3
56	YS	25	78	42	65	21	58	34	65	115	TT	74	34	24	17	42	25	16	25
57	YS	52	76	76	85	103	98	96	108	116	TT	75	35	63	12	98	12	62	8
58	YS	53	77	111	84	111	85	115	91	117	TT	102	42	77	31	68	55	78	41
59	SCL	3	40	14	43	37	19	48	18	118	TT	103	43	79	30	81	36	98	20

メータの組み合わせ効果を容易に比較できる。また、後述の樹冠形状値の主成分分析結果にこの序列を結びつけることで118園地の総合評価が可能になる。そこで、第14図に記した118園地の各データの順位を算出し、第8表に示した。さらに、この表からCDMPPFDあるいはODMPPFDについて、異なる樹齢間の順位相関係数を算出した(第9表)。順位相関係数は第7表の単相関係数より少し減少したが、総じて似ており、樹齢10年以降、同じ天候のDMPPFDの順位相関係数は0.84~0.93の範囲にあり(第9表)、異なる天候のそれは0.42~0.60の範囲にあった(第9表)。

Table 9 Coefficients of rank correlation between CDMPPFDs and ODMPPFDs in the four tree ages. Significance levels were as follow; $r > 0.321$ ($P < 0.001$), $r > 0.254$ ($P < 0.01$) and $r > 0.195$ ($P < 0.05$).

Tree age	5-year		10-year		15-year		20-year	
	CDMPPFD	ODMPPFD	CDMPPFD	ODMPPFD	CDMPPFD	ODMPPFD	CDMPPFD	ODMPPFD
5-year CDMPPFD	1.0000							
5-year ODMPPFD	-0.0675	1.0000						
10-year CDMPPFD	0.4870	0.0898	1.0000					
10-year ODMPPFD	0.1184	0.6903	0.5619	1.0000				
15-year CDMPPFD	0.4303	0.1624	0.8482	0.5323	1.0000			
15-year ODMPPFD	0.1578	0.6508	0.5806	0.8985	0.6027	1.0000		
20-year CDMPPFD	0.3827	0.1217	0.7610	0.4242	0.8549	0.5085	1.0000	
20-year ODMPPFD	0.1834	0.6634	0.5342	0.8942	0.5680	0.9343	0.4926	1.0000

Table 10 The comparison of several CHMPPFDs and OHMPPFDs of the 15-year of tree age between the five training systems (upper) and that of CDMPPFDs and ODMPPFDs in the four tree ages (lower). Numbers of trees in OC, MCL, YS, MCL and TT were 14, 30, 14, 30 and 30, respectively.

	C6HMPPFD	C7HMPPFD	C8HMPPFD	C9HMPPFD	C10HMPPFD	C11HMPPFD	C12HMPPFD
OC	58.7 bc ^z	129.4 c	229.8 c	325.8 bc	453.5 a	588.5 a	644.9 a
MCL	53.9 d	120.7 d	218.3 d	287.6 d	396.4 c	515.8 c	569.3 c
YS	58.0 c	126.1 c	226.3 c	312.6 c	427.3 ab	553.5 ab	604.4 b
SCL	60.6 b	136.0 b	253.3 b	335.0 ab	438.3 ab	541.7 b	585.9 bc
TT	63.3 a	141.0 a	274.6 a	341.3 a	429.6 b	524.0 bc	561.2 c
	C13HMPPFD	C14HMPPFD	C15HMPPFD	C16HMPPFD	C17HMPPFD	C18HMPPFD	
OC	585.4 a	445.0 a	319.3 c	225.7 c	129.3 c	59.0 bc	
MCL	522.3 c	405.8 b	297.4 d	223.1 c	121.1 d	54.3 d	
YS	555.8 ab	430.4 a	314.4 c	224.3 c	126.2 c	58.0 c	
SCL	541.1 bc	438.4 a	334.8 b	252.4 b	136.2 b	60.8 b	
TT	533.6 bc	441.3 a	348.1 a	271.2 a	140.3 a	62.7 a	
	O6HMPPFD	O7HMPPFD	O8HMPPFD	O9HMPPFD	O10HMPPFD	O11HMPPFD	O12HMPPFD
OC	34.7 c	107.3 a	126.3 a	122.8 cd	150.6 c	219.6 c	240.8 c
MCL	31.7 d	98.2 c	114.9 b	118.7 d	144.0 d	207.7 d	225.8 d
YS	34.9 c	107.2 a	124.4 a	126.4 c	156.1 c	225.9 c	247.0 c
SCL	36.2 b	108.9 a	124.8 a	132.5 b	166.0 b	245.4 b	268.5 b
TT	37.8 a	102.3 b	110.0 c	138.7 a	175.9 a	258.7 a	283.6 a
	O13HMPPFD	O14HMPPFD	O15HMPPFD	O16HMPPFD	O17HMPPFD	O18HMPPFD	
OC	220.2 c	152.0 c	124.1 b	126.3 a	106.5 a	35.7 b	
MCL	206.1 d	140.4 d	113.5 c	112.7 b	98.8 c	32.9 c	
YS	225.2 c	154.9 c	125.6 b	125.2 a	107.1 ab	35.5 b	
SCL	244.9 b	165.8 b	132.8 a	126.4 a	109.1 a	36.8 a	
TT	257.0 a	172.7 a	133.8 a	112.0 b	102.9 b	36.9 a	
	5-year CDMPPFD	10-year CDMPPFD	15-year CDMPPFD	20-year CDMPPFD			
OC	575.6 a	357.8 a	322.6 a	311.0 a			
MCL	553.8 b	328.7 b	291.2 b	282.6 b			
YS	569.8 a	347.4 a	309.0 a	296.0 ab			
SCL	574.0 a	352.1 a	316.5 a	304.4 a			
TT	554.6 b	354.9 a	317.9 a	306.5 a			
	5-year ODMPPFD	10-year ODMPPFD	15-year ODMPPFD	20-year ODMPPFD			
OC	200.2 d	150.9 b	135.9 c	130.5 b			
MCL	209.4 c	143.1 c	126.6 d	123.0 c			
YS	205.4 cd	154.2 b	138.1 b	132.2 b			
SCL	243.6 a	162.6 a	146.0 a	141.7 a			
TT	232.2 b	164.1 a	147.9 a	142.9 a			

^zDifferent letter indicates significance at 5% level by Tukey's multiple range test.

3. 仕立て方法の違いが果樹園の光環境に及ぼす影響

次に、樹齢5, 10, 15および20年における118園地のCHMPPFDおよびOHMPPFDのデータから各仕立て方法別の平均値を算出した。同一仕立て方法内に含まれたデータの違いは複数の整枝剪定パラメータの様々な組み合わせにより生じたものであったが、これらを偶然誤差と見立て、仕立て方法別平均値の多重比較検定を行ったものである。この結果のうち、樹齢15年に限り、13時刻のCHMPPFDおよびOHMPPFDについて、5仕立て方法間の平均値多重比較検定結果を第10表上に示した。多くの時刻においてTTのHMPPFD平均値が最も大きく、MCLのHMPPFD平均値が最も小さく、一部に有意差が認められたが、時刻によっては上記と異なる大小関係も見られた（第10表上）。他の樹齢における多重比較検定結果にも上記と似た大小関係が認められた（データ略）。第10表下に、4つの樹齢のCDMPPFDとODMPPFDに関する5仕立て方法間の平均値多重比較結果を示した。樹齢5年を例外として、樹齢10, 15および20年のCDMPPFD平均値には総じてTT ≧ SCL ≧ OC > ≧ YS > MCL, ODMPPFDには総じてTT ≧ SCL > YS > ≧ OC > MCLの大小関係が認められた（第10表下）。

4. 整枝剪定パラメータ値の違いが果樹園の光環境に及ぼす影響

方法で記したように、同一仕立て方法内の樹は数種類の整枝剪定パラメータ値（いずれも2者択一の値）を組み合わせて構築された（第2表）。そこで、同一仕立て方法内に限定し、ある1つの整枝剪定パラメータに注目して2組に分け、CDMPPFDあるいはODMPPFDの平均値を比較した。この場合、注目しなかった整枝剪定パラメータ値の組み合わせによる影響を偶然誤差と見立て、t分布検定を行ったものである（第11表）。樹齢5年と樹齢10年以降との間には傾向が異なったので（第11表）、以下、樹齢10年以降に限定してその大小関係を検討した。その結果、主枝長分布（DPPSBL）が等長（EL）と下長（BL）の比較において、OCとYSではCDMPPFD, ODMPPFDとも、等長（EL）>下長（BL）の大小関係、MCL, SCLおよびTTでは等長（EL）<下長（BL）の大小関係が見られ、一部に有意差が認められた。また、多くの仕立て方法で、主枝当たりの垂主枝数（NSSB）が少ない方がCDMPPFD, ODMPPFDとも大きくなるケースが見られ、一部に有意差が認められた。さらに、垂主枝長分布

（DPSSBL）が等長（EL）と下長上短（BL）の比較において、MCL, YSおよびSCLではCDMPPFD, ODMPPFDとも等長（EL）>下長上短（BL）の大小関係が見られ、一部に有意差が認められた。しかし、主枝分岐角度分布（BADPPSB）が等角度（EA）と上狭下広（BW）の比較では、該当する全ての仕立て方法間で有意差は認められなかった。同様に、新梢傾斜角度限界（LIAVS）が50度と70度の間にはCDMPPFD, ODMPPFDとも明瞭な大小関係は見られなかった。

5. 118樹における樹冠形状値の変動範囲とその因子分析結果

樹齢5, 10, 15および20年、各118樹における1樹当たり107個の樹冠形状値のデータについて、その変動範囲、平均値、変動係数などを調査した。この調査結果から、樹齢15年の各樹冠形状値の平均値と変動係数を第12表に示した。変動係数の大きいものとして、樹冠底部高（HCB）、段空隙ブロック数の変動係数（CVNEBHC）、閉鎖空間内総葉数（NLES）、樹冠各部位の内部空隙体積割合（PVCEB, PVCEBQS, PVCEBQN, PVCEBQWおよびPVCEBQE）、東側と西側の樹冠表面陥没空隙体積割合（PVCCSQEおよびPVCCSQW）、樹冠の上部と下部の葉ブロック体積割合（PVLBUおよびPVLBL）、樹冠の東側、上部および下部の空葉比（REBLBQE, REBLBUおよびRELBL）などが認められた（第12表）。変動係数の小さいものとして、樹冠各方向の葉ブロック連続数の平均値（MCFNS, MCFEW, MCFVD, MCF45S, MCF45N, MCF45E および MCF45W）、樹冠各方向の透過度（TPNSD, TPEWD, TP3D, TP45S, TP45N, TP45E および TP45W）、樹冠各部位の空隙ブロック体積割合（PVEBQS, PVEBQN, PVEBQE, PVEBQW, PVEBU, PVEBMおよびPVEBL）などが認められた（第12表）。樹齢20年についてもほぼ類似した傾向が見られた（データ略）。また、樹齢5年、樹齢10年のように樹齢が若いとこれらの変動係数は全般に大きくなった（データ略）。

樹冠形状値群における因子構成を明らかにするため、4つの樹齢における全樹冠形状値を用いて、各樹齢とも8因子（当初設定）までのバリマックス法を用いて因子分析を行い、各樹齢における因子付加量（factor loading, FL）と累積寄与率（cumulative coefficient of determination, CCD）を比較した。ここでは、樹齢15年と樹齢20年の因子分析の結果を詳しく記すとともに（第13表）、樹齢

Table 11 The comparison of CDMPPFDs and ODMPPFDs in each training system between parameters for training-pruning (PTP) in the four tree ages. n indicates the numbers of tree per parameter in each training system.

Trainings	Tree age	\ PTP		DPPSBL		BADPPSB		NSSB		DPSSBL		LIAVS	
		VPTP ^z	EL	BL					EL	BL	50	70	
		n	8	6				3	5	8	6	7	7
OC	5-year	CDMPPFD	576	575				578	572 ^{*y}	576	576	575	576
	10-year	CDMPPFD	363	349				362	350	356	359	353	360
	15-year	CDMPPFD	332	310				328	313	325	319	320	319
	20-year	CDMPPFD	316	305				313	303	309	309	313	309
	5-year	ODMPPFD	200	201				203	198 [*]	200	204	201	202
	10-year	ODMPPFD	151	149				154	148 [*]	149	152	149	152
	15-year	ODMPPFD	139	131				139	131 [*]	135	135	133	135
	20-year	ODMPPFD	131	128				134	127 [*]	129	130	132	129
MCL		VPTP	EL	BL	EA	BW	2	3	EL	BL	50	70	
		n	16	14	14	16	14	16	14	16	15	15	
	5-year	CDMPPFD	557	550 ^{**}	557	551 ^{**}	553	554	552	555	554	554	554
	10-year	CDMPPFD	326	332	326	331	333	326	335	324 ^{**}	326	331	326
	15-year	CDMPPFD	290	292	293	290	292	291	298	286 [*]	287	294	294
	20-year	CDMPPFD	282	284	283	282	285	282	291	275 [*]	278	285	285
	5-year	ODMPPFD	206	213 ^{**}	209	210	211	208	206	213 ^{**}	210	210	210
	10-year	ODMPPFD	144	142	142	144	145	142	144	142	142	144	144
15-year	ODMPPFD	125	128	127	126	126	127	128	125	126	127	127	
20-year	ODMPPFD	122	124	123	123	124	123	124	122	122	124	124	
YS		VPTP	EL	BL			3	5	EL	BL	50	70	
		n	8	6			6	8	8	6	7	7	
	5-year	CDMPPFD	573	567			564	573	568	571	569	568	
	10-year	CDMPPFD	352	339			351	342	348	343	349	340	
	15-year	CDMPPFD	314	301			312	305	311	301	307	306	
	20-year	CDMPPFD	303	284 [*]			297	290	298	285	295	289	
	5-year	ODMPPFD	204	207			203	207	205	207	203	206	
	10-year	ODMPPFD	154	153			157	151 ^{**}	156	150 [*]	154	153	
15-year	ODMPPFD	139	136			142	135 ^{**}	140	133 [*]	137	137		
20-year	ODMPPFD	133	129			137	127 ^{**}	134	127 [*]	131	130		
SCL		VPTP	EL	BL	EA	BW	1	2	EL	BL	50	70	
		n	14	16	14	16	14	16	14	16	15	15	
	5-year	CDMPPFD	580	567 ^{**}	579	568 [*]	580	566 ^{**}	573	572	574	574	
	10-year	CDMPPFD	350	353	348	355	362	341 ^{**}	355	348	350	353	
	15-year	CDMPPFD	316	317	315	318	321	311 [*]	319	314	316	318	
	20-year	CDMPPFD	304	303	306	304	307	299 [*]	304	303	306	302	
	5-year	ODMPPFD	247	242	246	243	235	251 ^{**}	246	243	244	244	
	10-year	ODMPPFD	160	165 [*]	163	162	163	162	163	162	162	163	
15-year	ODMPPFD	144	147	146	146	145	146	146	146	146	146		
20-year	ODMPPFD	141	142	143	141	141	142	142	142	141	142		
TT		VPTP	EL	BL	EA	BW	2	3	EL	BL	50	70	
		n	16	14	14	16	16	14	16	14	15	15	
	5-year	CDMPPFD	554	556	555	553	556	552	233	233	554	553	
	10-year	CDMPPFD	349	362	359	350	363	346 [*]	352	358	357	352	
	15-year	CDMPPFD	312	323	321	315	326	309 [*]	315	322	321	314	
	20-year	CDMPPFD	300	312	310	302	313	300	305	308	310	302	
	5-year	ODMPPFD	234	231	232	233	227	238 ^{**}	234	233	233	233	
	10-year	ODMPPFD	161	167 ^{**}	163	166	164	164	164	166	164	165	
15-year	ODMPPFD	145	151 ^{**}	147	149	148	149	149	148	147	149		
20-year	ODMPPFD	140	146 ^{**}	141	145	144	143	144	142	143	143		

^zValues of parameters for training-pruning shown in Table 2.^y* and ^{**} indicates significance at 5% and 1% level by t-distribution test, respectively.

5年と樹齢10年における因子付加量データの表示は省略し、因子構成の概要だけを記した。

樹齢15年の各因子に属する樹冠形状値の因子付加量 (FL) を第13表左上に示した。なお、因子付加量の絶対

Table 12 Means and coefficients of variation of the 107 characteristics of canopy shapes (CCSs) of the 118 trees in the 15-year of tree age. The abbreviations and units refer to Table 3 and 4.

CCSs	Mean	CV(%)	CCSs	Mean	CV(%)
ASLC	15.05	10.9	PVCCSQW	3.13	45.7
CVLAD	192.93	8.6	PVCEB	0.24	51.7
CVNEBA	98.37	7.4	PVCEBQE	0.17	102.7
CVNEBEWVC	4.96	17.2	PVCEBQN	0.27	72.8
CVNEBHC	5.06	41.8	PVCEBQS	0.27	78.1
CVNEBNSVC	4.52	22.6	PVCEBQW	0.37	66.8
CVNLBA	64.55	7.9	PVCODQE	2.88	54.7
CVNLEWVC	142.02	38.2	PVCODQN	3.31	40.6
CVNLHC	120.87	22.5	PVCODQS	3.53	39.7
CVNLNSVC	116.44	17.8	PVCODQW	3.84	46.7
HCB	25.21	65.0	PVEBL	95.42	2.4
LAIa	1.41	26.0	PVEBM	91.76	2.2
LAIc	4.30	11.2	PVEBQE	96.43	2.0
LAO	5.04	34.8	PVEBQN	94.90	1.5
MAXLAD	1.21	23.9	PVEBQS	94.67	1.7
MAXNLBA	8.41	23.4	PVEBQW	93.69	2.1
MCF45E	1.09	7.2	PVEBU	98.66	1.2
MCF45N	1.55	7.8	PVLB	4.72	23.9
MCF45S	1.56	9.1	PVLBL	4.58	49.1
MCF45W	1.53	8.2	PVLBM	8.24	24.4
MCFEW	1.95	7.9	PVLBQE	3.57	54.6
MCFNS	1.96	8.8	PVLBQN	5.10	27.9
MCFVD	1.93	8.1	PVLBQS	5.33	30.5
MCT3D	147.53	13.9	PVLBQW	6.31	31.3
MCT45E	196.31	16.6	PVLBU	1.34	86.0
MCT45N	189.88	19.1	PVOEB	89.32	3.4
MCT45S	197.42	27.5	PVOEBQE	91.40	4.8
MCT45W	183.01	14.0	PVOEBQN	88.85	3.8
MCTEW	143.46	34.1	PVOEBQS	88.12	3.9
MCTNS	156.15	26.1	PVOEBQW	86.35	5.7
MCTVD	142.99	29.8	RELBL	28.56	65.4
MLAD	0.06	11.1	RELBLM	11.93	28.6
MNEB	420.18	1.2	RELBLQE	40.82	75.3
MNEBA	6.26	12.2	RELBLQN	20.41	33.8
MNLBA	1.92	6.0	RELBLQS	19.68	35.0
MNLC	355.93	31.0	RELBLQW	16.35	31.3
MVEBA	0.04	21.6	RELBLU	>10 ⁸	764.8
MVLBA	0.01	19.2	SDLAD	0.12	12.3
NEB	8822.81	1.2	SDNEBA	6.15	13.0
NEBA	1427.84	10.9	SDNLBA	1.24	12.2
NL	7474.60	31.0	TH	335.44	8.7
NLB	437.19	23.9	TP3D	67.79	8.9
NLBA	227.14	22.0	TP45E	66.31	10.5
NLES	3062.58	55.0	TP45N	75.22	8.1
PNLES	38.02	30.5	TP45S	75.42	8.1
PSLB	78.38	8.4	TP45W	73.94	6.1
PSLBQE	83.64	10.6	TPEWD	66.98	6.2
PSLBQN	80.17	9.8	TPNSD	69.37	9.3
PSLBQS	79.70	10.6	TPVD	67.02	14.7
PSLBQW	74.46	9.7	TWEW	300.47	25.1
PVCCS	2.41	32.0	TWNS	326.68	14.9
PVCCSQE	1.99	55.2	VLB	2.79	31.9
PVCCSQN	2.47	37.7	VSS	58.65	15.7
PVCCSQS	2.75	33.1			

値が大きい樹冠形状値ほどその因子の特徴をより強く有するとともに、因子負荷量の符号はその特徴付けの方向を示す。因子1には樹冠内空隙の多少に密接な樹冠形状値、因子2には樹冠葉層の厚さに密接な樹冠形状値、因子3には樹冠北側部分に密接な樹冠形状値、因子4には樹冠南側部分に密接な樹冠形状値、因子5には樹高、因子6には葉ブロックの葉面積密度に密接な樹冠形状値が認められた。ただし、樹齢15年ではバリマックス法による因子負荷量の算出は因子6までであった。また、最終的累積寄与率は81.9%であった（第13表左下）。樹齢20年の場合、因子1から因子4までは樹齢15年に似た結果であり、因子5には土地あたりの葉面積に密接な樹冠形状値、因子6には樹高、因子7には葉ブロックの葉面積密度に密接な樹冠形状値が認められた（第13表右上）。また、樹齢20年ではバリマックス法による因子負荷量の算出は因子7までであり、最終的累積寄与率は81.6%であった（第13表右下）。

樹齢5年の場合、因子1には樹冠内空隙の多少に密接な樹冠形状値、因子2には樹冠葉層の厚さに密接な樹冠形状値、因子3には樹冠南側部分に密接な樹冠形状値、因子4には樹冠西側部分に密接な樹冠形状値、因子5には樹冠北側部分に密接な樹冠形状値、因子6には樹冠内部の空隙体積に密接な樹冠形状値、因子7には葉塊に密接な樹冠形状値、因子8には樹冠表面の葉ブロックに密接な樹冠形状値が認められ（データ略）、最終的累積寄与率は77.67%であった。樹齢10年の場合、因子1には樹冠内空隙の多少に密接な形状値、因子2には樹冠葉層の厚さに密接な樹冠形状値、因子3には樹冠北側部分に密接な樹冠形状値、因子4には樹冠南側部分に密接な形状値、因子5にはLAI c、因子6には葉分布の垂直分布に密接な樹冠形状値、因子7には葉塊に密接な樹冠形状値、因子8には内部空隙体積割合が認められ（データ略）、最終的累積寄与率は80.98%であった。なお、いずれの樹齢でも、因子に分類できなかった樹冠形状値が幾つか認められた。また、4つの樹齢を比較すると、樹齢が低いほど因子が細かく分かれたのに対し、樹齢が高いと因子数が減った。

上記のように、樹齢が異なることで因子の総数、因子番号（順番）などが少しずつ異なったことから、後述の解析に用いる都合上、上記の樹齢10、15、20年の因子の内容と因子番号を以下のような因子略名と因子記号（括弧内）を用いて統一したものである。すなわち、空隙の

Table 13 Factor loadings (FLs) of characteristics of canopy shape (CCSs) in each factor from factor analyses of the 15-year of tree age (left) and that of the 20-year of tree age (right) in the upper part of the table. Coefficients of determination (CDs) and cumulative coefficients of determination (CCDs) were shown in the lower. Abbreviations of CCSs refer to Table 3 and 4.

15- year of tree age				20-year of tree age			
Factor 1	FL	Factor 2	FL	Factor 1	FL	Factor 2	FL
TP45N	0.9372	MCFVD	0.9111	TPNSD	0.9408	MCFVD	0.9228
TP45S	0.9371	MCF45S	0.8993	TP45N	0.9238	MCF45N	0.9129
PVOEB	0.9369	MCFNS	0.8854	CVNLEWVC	0.9221	MCFEW	0.8972
TP3D	0.9363	MCF45W	0.8728	TP3D	0.9161	MCF45W	0.8936
TPNSD	0.9354	PNLES	0.8723	TP45S	0.9108	MCF45S	0.8834
CVNLEWVC	0.9309	MCF45N	0.8722	PVOEB	0.9091	PNLES	0.8516
PVOEBQW	0.9027	MVLBA	0.8591	PVOEBQE	0.9052	MCFNS	0.8510
PVOEBQE	0.8889	MCFEW	0.8438	PVEBQE	0.8654	MVLBA	0.8187
NEB	0.8651	CVNLHC	0.8176	NEB	0.8586	CVNLHC	0.7758
MNEB	0.8651	MNLBA	0.8063	MNEB	0.8586	NLES	0.7488
PVEBQW	0.8618	SDNLBA	0.8010	PVOEBQW	0.8487	PVEBU	0.7450
REBLBQW	0.8447	ASLC	0.7666	TOVD	0.8198	MNLBA	0.7438
TOVD	0.8413	VSS	0.7666	MVEBA	0.8115	ASLC	0.7117
PVEBQE	0.8217	NLES	0.7627	REBLBQW	0.7983	VSS	0.7117
SDNEBA	0.8129	PVEBU	0.7341	SDNEBA	0.7945	SDNLBA	0.6558
MVEBA	0.8085	CVNEBHC	0.6679	PVEBQW	0.7908	CVNEBHC	0.6518
REBLBQE	0.7807	MAXNLBA	0.6279	REBLBQE	0.7568	MVLBA	0.5943
TP45E	0.7570	CVNLBA	0.6212	REBLBM	0.7424	MCT3D	0.5819
TP45W	0.7430	MVLBA	0.6135	PVEBM	0.7349	MAXNLBA	0.5445
PVEBL	0.7041	MCTNS	0.6050	TP45W	0.7109	MCTNS	0.5444
REBLBM	0.7037	MCT3D	0.5489	TP45E	0.6991	MCTEW	0.5404
PVEBM	0.7029	PSLBQE	-0.6225	REBLBL	0.6293	PSLBQN	-0.5452
REBLBL	0.6962	CVNEBA	-0.6281	PVEBL	0.6273	CVNEBA	-0.6026
TPEWD	0.6292	PVLBQN	-0.6284	TPEWD	0.5723	PSLBQE	-0.6702
MCT45S	0.5353	PVLBU	-0.7341	MCTVD	0.5585	PSLBQS	-0.6729
MCTVD	0.5043	PSLBQW	-0.7521	MCT45S	0.5218	PVLBU	-0.7450
MCTEW	-0.5188	PSLBQSE	-0.7746	PVCEBQW	-0.5013	PSLBQW	-0.7450
PVCEBQW	-0.5461	PSLB	-0.8392	PVCEBQE	-0.6216	PSLB	-0.8274
PVCEBQE	-0.5569	Factor 3	FL	PVLBL	-0.6273	Factor 3	FL
PVCEB	-0.6414	PVEBQN	0.9700	PVCEB	-0.6599	PVEBQN	0.9665
VLB	-0.6734	REBLBQN	0.9408	VLB	-0.6621	PVOEBQN	0.9326
MNLC	-0.7004	PVOEBQN	0.9257	MNLC	-0.7041	REBLBQN	0.8674
NL	-0.7004	CVNEBEWVC	-0.5285	NL	-0.7041	MCT45W	0.5207
PVLBM	-0.7029	PVCEBQN	-0.6406	PVCCSQW	-0.7132	CVNEBEWVC	-0.6030
PVLBL	-0.7041	PVCCSQN	-0.6527	LAO	-0.7135	PVCEBQN	-0.6387
LAO	-0.7415	PVCODQN	-0.7040	PVLBM	-0.7349	PVCODQN	-0.6812
PVCCSQW	-0.7642	PVLBQN	-0.9700	NEBA	-0.7726	PVCCSQN	-0.6971
NEBA	-0.7756	Factor 4	FL	PVCODQW	-0.7875	PVLBQN	-0.9665
PVCODQE	-0.8020	REBLBQS	0.8461	PVLBQW	-0.7908	Factor 4	FL
LA1a	-0.8061	PVEBQS	0.8262	PVCODQE	-0.8100	PVEBQS	0.8576
PVLB	-0.8217	PVOEBQS	0.8085	LA1a	-0.8167	PVOEBQS	0.8378
CVNEBNSVC	-0.8263	CVNLNSVC	0.5236	CVNEBNSVC	-0.8335	REBLBQS	0.8320
PVCODQW	-0.8342	PVCCSQS	-0.5436	PVCCS	-0.8360	PVCODQS	-0.5159
TWEW	-0.8554	PVCODQS	-0.5794	PVCCSQE	-0.8469	PVCCSQS	-0.6381
PVCCSQE	-0.8616	PVLBQS	-0.8262	TWEW	-0.8563	PVCEBQS	-0.6474
PVLBQW	-0.8618	Factor 5	FL	NLB	-0.8586	PVLBQS	-0.8576
PVLB	-0.8651	TH	0.6670	PVLB	-0.8586	Factor 5	FL
NLB	-0.8651	Factor 6	FL	PVLBQE	-0.8654	LA1c	0.6391
NLBA	-0.9017	SDLAD	0.8705	NLBA	-0.8945	MLAD	0.5692
PVCCS	-0.9019	MLAD	0.8327			TWNS	-0.5818
		LA1c	0.6826			Factor 6	FL
		MAXLAD	0.5152			TH	0.6575
						Factor 7	FL
						SDLAD	0.8422
						MAXLAD	0.6791
						CVLAD	0.5605

Factor No.	CDs(%)	CCDs(%)
1	33.98	33.98
2	21.98	55.96
3	7.67	63.63
4	6.90	70.53
5	3.66	74.19
6	3.43	77.61
7	2.36	79.97
8	1.95	81.92

Factor No.	CD(%)	CCD(%)
1	32.58	32.58
2	20.18	52.76
3	8.02	60.78
4	7.09	67.86
5	4.75	72.61
6	4.65	77.26
7	2.48	79.74
8	1.87	81.60

多少に密接な樹冠形状値群の因子には空隙因子（因子A）、樹冠葉層の厚さに密接な樹冠形状値群の因子には樹冠の厚さ因子（因子B）、樹冠北側部分に密接な樹冠形状値群の因子には北側形状因子（因子C）、樹冠南側部分に密接な樹冠形状値群の因子には南側形状因子（因子D）、樹高には樹高因子（因子E）、葉ブロックの葉面積密度に密接な樹冠形状値群には葉面積密度因子（因子F）、土地あたりの葉面積にはLAI因子（因子G）、葉量の垂直分布に密接な樹冠形状値群の因子には葉量垂直分布因子（因子H）、葉塊に密接な樹冠形状値群の因子には葉塊因子（因子I）、内部空隙体積割合に関連した因子には内部空隙因子（因子J）とした。

6. 樹冠形状値とCDMPPFDおよびODMPPFDとの間の単相関関係

4つの樹齢における各118樹の全樹冠形状値と各樹齢におけるCDMPPFDおよびODMPPFDの間の単相関係数を算出した。これらの結果から、樹齢15年における単相関係数を第14表に示した。

CDMPPFDとの間に負の相関関係が顕著なものとして、葉ブロック平均連続数に関連した樹冠形状値（MCFNSなど）、LAIc、閉鎖空間内葉数に関連した樹冠形状値（NLESなど）、葉ブロック葉面積密度に関連した樹冠形状値（MAXLAD）、葉塊に関連した樹冠形状値（MAXNLBAなど）が認められた（第14表）。一方、CDMPPFDとの間に正の相関関係が顕著なものとして、樹冠表面の葉ブロック数に関連した樹冠形状値（PSLBなど）が認められた（第14表）。また、これら以外にも有意な相関関係が数多く認められ、たとえば、負の相関関係として葉ブロック体積割合に関連した樹冠形状値（PVLBなど）や葉層の平均厚に関連した樹冠形状値（MCT45Eなど）、正の相関関係として樹冠各部位の空隙ブロック体積割合（PVEBMなど）、空隙ブロック数（NEB）、空葉比に関連した樹冠形状値（REBLBQEなど）があった（第14表）。

CDMPPFDに比べODMPPFDとの間には、顕著な相関関係を有する樹冠形状値の数が増えた（第14表）。ODMPPFDとの間に負の相関関係が顕著なものとして、葉ブロック平均連続数に関連した樹冠形状値（MCFNSなど）、LAIa、閉鎖空間内葉数に関連した樹冠形状値（NLESなど）、葉ブロックの葉面積密度に関連した樹冠形状値（MAXNLBAなど）、葉層の平均厚に関連した樹冠形

状値（MCTNSなど）、葉塊に関連した樹冠形状値（MAXNLBAなど）、樹冠占有面積（LAO）、葉ブロック体積割合に関連した樹冠形状値（PVLBなど）、樹冠表面の下向き陥没空隙体積割合に関連した樹冠形状値（PVCODQEなど）が認められた（第14表）。一方、ODMPPFDとの間に正の相関関係が顕著なものとして、

Table 14 Coefficients of correlation between most characteristics of canopy shape (CCSs) and CDMPPFDs or ODMPPFDs of the 118 orchards in the 15-year of tree age. Significance levels were as follow; $r > 0.321$ ($P < 0.001$), $r > 0.254$ ($P < 0.01$) and $r > 0.195$ ($P < 0.05$). Abbreviations of CCSs refer to Table 3 and 4.

CCSs	CDM-PPFD	ODM-PPFD	CCSs	CDM-PPFD	ODM-PPFD
MNEB	0.2248	0.6485	TP45E	0.0537	0.5726
CVNEBHC	-0.3009	-0.7651	TP45W	0.0981	0.6249
CVNEBNSV	-0.2355	-0.2458	PVCCS	0.1225	-0.1572
CVNEBEWV	-0.2422	-0.1549	PVCEB	-0.1121	-0.3876
LAO	-0.1393	-0.6472	PVOEB	0.0644	0.5028
LAIc	-0.5936	-0.0866	PVLB	-0.2248	-0.6485
LAIa	-0.3810	-0.7529	PVCCSQS	0.0353	-0.2243
MLAD	-0.3867	-0.2662	PVCODQS	-0.2014	-0.5007
SDLAD	-0.4248	-0.3423	PVEBQS	-0.2467	-0.4007
CVLAD	-0.1147	-0.1339	PVOEBQS	0.2515	0.5716
MAXLAD	-0.4260	-0.4445	PVLBQS	-0.3520	-0.6131
MCTVD	0.0244	0.4815	PVCCSQN	0.2338	-0.0110
MCTNS	-0.1277	-0.4984	PVCODQN	0.0870	-0.4332
MCTEW	-0.1483	-0.4605	PVEBQN	0.0498	-0.1351
MCT3D	-0.1853	-0.3625	PVOEBQN	-0.0808	0.3327
MCT45S	-0.1465	0.2761	PVLBQN	-0.0505	-0.3532
MCT45N	-0.0007	-0.0867	PVCCSQE	-0.0021	-0.3005
MCT45E	-0.2264	0.0673	PVCODQE	-0.1530	-0.5557
MCT45W	-0.0686	0.2491	PVEBQE	-0.2128	-0.4108
NL	-0.3994	-0.7932	PVOEBQE	0.1850	0.5376
NLES	-0.5045	-0.8301	PVLBQE	-0.2746	-0.5614
PNLES	-0.5530	-0.7617	PVCCSQW	0.1710	0.1226
NLB	-0.2248	-0.6485	PVCODQW	0.1799	-0.0990
MCFNS	-0.5743	-0.6920	PVEBQW	0.1138	0.0165
MCFEW	-0.5142	-0.7363	PVOEBQW	-0.1312	0.0478
MCFVD	-0.5964	-0.6466	PVLBQW	0.0259	-0.1199
MCF45S	-0.5752	-0.6632	PVLBU	0.2526	0.5671
MCF45N	-0.6036	-0.6530	PVLBM	-0.3069	-0.6988
MCF45E	-0.4220	-0.0985	PVLBL	-0.1928	-0.6407
MCF45W	-0.5468	-0.6980	PVEBQS	0.3520	0.6131
NLBA	-0.1076	-0.5454	PVEBQN	0.0505	0.3532
MNLBA	-0.4942	-0.5536	PVEBQE	0.2746	0.5614
MVLBA	-0.3074	-0.4819	PVEBQW	-0.0259	0.1199
SDNLBA	-0.4884	-0.5132	PVEBU	-0.2526	-0.5671
CVNLBA	-0.3777	-0.3726	PVEBM	0.3069	0.6988
MAXNLBA	-0.4247	-0.5499	PVEBL	0.1928	0.6407
NEBA	-0.0056	-0.2276	REBLBQS	0.2032	0.5098
NEB	0.2248	0.6485	REBLBQN	0.0273	0.2985
MNEBA	0.0414	0.2978	REBLBQE	0.2729	0.5388
MVEBA	-0.1024	-0.0868	REBLBQW	0.0641	0.1859
SDNEBA	0.1531	0.5651	REBLBU	-0.1314	-0.1859
CVNEBA	0.2142	0.5227	REBLBM	0.2914	0.6935
TPNSD	-0.0071	0.2049	RELBL	0.1269	0.5494
TOEWD	-0.1245	0.1690	PSLBQS	0.4715	0.7380
TPVD	0.0919	0.6026	PSLBQN	0.4821	0.6869
TP3D	0.0187	0.4396	PSLBQE	0.4309	0.6121
TP45S	0.0260	0.5009	PSLBQW	0.5081	0.7280
TP45N	0.0934	0.4406	PSLB	0.5552	0.8070

樹冠表面の葉ブロック数に関連した樹冠形状値 (PSLB など), 樹冠各部位の空隙ブロック体積割合に関連した樹冠形状値 (PVOEBQS など), 各方向からの透過度 (TPVD など), 樹冠各部位の空葉比に関連した樹冠形状値 (REBLBM など) が認められた (第14表). また, これら以外にも有意な相関関係が多く認められた (第14表). 樹齢10年および20年の場合にもほぼ似た相関関係が認められた (データ略).

7. 樹冠形状値とCDMPPFDおよびODMPPFDとの間の重相関関係

樹冠形状値により118園地の光環境の変動をどれだけ説明できるかを明らかにするために, 樹齢10, 15および

20年の各107個の形状値を用いて, CDMPPFDあるいはODMPPFDを目的変数とした重回帰分析 (変数増減法) を行い, これらの結果の一部を第15表に示した. いずれの樹齢でも, 5. の因子分析で見出された各因子に関係した樹冠形状値が少数ずつ取り込まれた (第15表). すなわち, 樹齢10年のCDMPPFDには因子Aから10個, 因子Bから7個, 因子Cから2個, 因子G, HおよびIからそれぞれ1個, 因子外から3個が取り込まれ, ODMPPFDには因子Aから11個, 因子Bから8個, 因子Gから2個, 因子外から3個が取り込まれ, 決定係数はそれぞれ約0.93および約0.97と著しく大きかった (第15表). 樹齢15年のCDMPPFDには因子Aから18個, 因子Bから9個, 因子Cから2個, 因子Fから2個, 因子DおよびEか

Table 15 Results of multiple regression analyses of CDMPPFD or ODMPPFD in the three tree ages (the10-year, 15-year and 20-year) using characteristics of canopy shape (CCSs) by a stepwise method. PRC, CV, CD and IV indicates partial regression coefficient, criterion variable, coefficient of determination ($=R^2$) and incorporated variable, respectively. The abbreviations of CCSs refer to Table 3 and 4.

Tree age	10-year	Tree age	10-year	Tree age	15-year	Tree age	15-year	Tree age	20-year	Tree age	20-year
CV: CDMPPFD		CV: ODMPPFD		CV: CDMPPFD		CV: ODMPPFD		CV: CDMPPFD		CV: ODMPPFD	
CD=0.930		CD=0.975		CD=0.970		CD=0.949		CD=0.880		CD=0.939	
F value=46.2		F value=148.5		F value=66.8		F value=84.5		F value=49.9		F value=59.3	
Significance	P<0.001	Significance	P<0.001	Significance	P<0.001	Significance	P<0.001	Significance	P<0.001	Significance	P<0.001
IV	PRC	IV	PRC	IV	PRC	IV	PRC	IV	PRC	IV	PRC
LAIc	-0.5960	PSLB	0.4117	PSLB	0.7175	LAIa	-0.4957	MCFEW	-0.3773	NLES	-0.3458
MCTVD	0.3576	TP45N	-0.3790	MCF45W	-0.4332	TP45N	-0.4483	LAIc	-0.4749	CVLAD	0.2729
CVNEBNSVC	-0.4143	LAIa	-0.6136	CVNLHC	0.5054	REBLBM	0.4015	MCT3D	0.4689	TP45N	-0.6575
SDNEBA	0.2924	TP45S	0.6120	MLAD	-0.5316	MCT45S	0.4455	PVOEBQS	0.2293	LAIa	-0.4800
TP45S	-0.5425	PVCCSQW	0.4324	CVNEBEWVC	-0.7074	CVNEBEWVC	-0.5107	CVNENNSVC	-0.4667	SDNLBA	0.3124
PVCODQE	-0.4507	TP45E	-0.2082	MNLC	0.2267	MCFNS	-0.4300	TP45S	-0.2807	TP45W	-0.4120
NLES	-0.4024	RELBL	0.5467	HC	0.4747	CVNLHC	-0.2997	CVLAD	0.3800	PVCEBQW	0.4615
CVNLEWVC	-0.6029	MCT3D	0.3814	PVCCSQE	-0.3592	MCT45E	-0.2593	NLES	-0.5943	HC	0.2545
REBLBQN	0.3330	CVNLHC	-0.4924	MCFEW	0.5641	MCF45S	0.3125	MAXLAD	-0.2725	PSLBQW	0.5622
SDNLBA	0.3653	REBLBM	0.5076	TP45S	-0.7354	NLES	0.5141	CVNEBEWVC	-0.3188	MCF45W	0.4344
MCF45W	-0.2734	PVEBM	-0.3421	REBLBQE	0.5374	PSLB	0.3286	MCT45N	0.2963	CVNENNSVC	-0.5157
REBLBQW	0.3487	CVNEBEWVC	-0.4443	TWNS	0.4907	PVCEBQS	0.1599	MCT45E	0.2752	REBLBQN	0.3209
MAXNLBA	-0.2378	TP3D	-0.4441	TPNSD	0.2583	MNLBA	-0.1902	MCFNS	0.2415	REBLBQW	-0.2494
MCF45S	0.1853	CVNEBHC	0.4699	MCFNS	-0.4137	NLES	-0.4027	TP45E	-0.1663	TPVD	0.3467
TP45N	0.3853	SDLAD	0.3388	CVNLNSVC	-0.5836	CVNLNSVC	-0.3198	PSLBQN	0.1560	PVOEB	0.2074
REBLBM	0.2449	PVCEBQE	-0.2316	MNEBA	0.3928	PVCEBQN	-0.2908			MCT45E	0.4117
TWEW	-0.1779	SDNEBA	0.1994	CVLAD	0.4761	SDNLBA	0.2737			MCTNS	0.2233
PVLBL	-0.2792	MAXNLBA	-0.1735	MAXLAD	-0.5072	PVLBM	0.1949			REBLBQS	0.2918
PSLBQS	-0.2919	LAIc	0.2613	NEBA	0.3582	PVCODQN	-0.2289			MCF45S	0.2793
PVCEBQS	-0.3298	NLES	0.2595	MCTVD	0.4772	MAXNLBA	0.1979			MVEBA	-0.3897
PVOEBQN	-0.1928	CVLAD	-0.3052	PVOEBQE	-0.2542	CVNEBHC	0.1607			CVNLHC	0.2118
MCT45N	-0.1896	MLAD	-0.2739	MVLBA	-0.3149					PVCEBQN	-0.2923
VLB	0.3180	MCFEW	-0.1989	PVCCSQS	0.4854					SDNLBA	-0.2216
PNLES	0.2375	MCTVD	-0.1706	PVCCS	-0.4550					MCF45E	-0.1497
MCFVD	-0.1668			PVEBQW	-0.2612						
MAXLAD	0.2652			PVLBQW	-0.2612						
				RELBLU	-0.4424						
				MCT45W	0.3306						
				TH	-0.4361						
				PSLBQS	-0.3838						
				MCTEW	-0.2544						
				SDNEBA	-0.3423						
				RELBL	0.2354						
				TWEW	-0.2000						
				PVEBQE	-0.2532						
				NL	-0.2267						
				PVCEBQN	-0.1615						
				CVNEBHC	-0.1605						

らそれぞれ1個，因子外から5個が取り込まれ，ODMPPFDには因子Aから6個，因子Bから9個，因子Cから3個，因子Dから1個，因子外から2個が取り込まれ，決定係数はそれぞれ約0.97および約0.95と著しく大きかった（第15表）．樹齢20年のCDMPPFDには因子Aから4個，因子Bから5個，因子Fから2個，因子DおよびGからそれぞれ1個，因子外から2個が取り込まれ，ODMPPFDには因子Aから9個，因子Bから6個，因子Cから2個，因子Dから1個，因子外から5個が取り込まれ，決定係数はそれぞれ約0.88および約0.93と大きかった（第15表）．

8. 仕立て方法の違いが樹冠形状値に及ぼす影響

仕立て方法の違いにより果樹園光環境の良否が生じた（3.を参照）原因を解明するため，各樹冠形状値の平均値に関する仕立て方法間の比較を行った．この場合，同一仕立て方法内各樹における樹冠形状値の違いを整枝剪定パラメータの様々な組み合わせにより生じた偶然誤差と見立て，Tukeyの多重比較検定を行ったものである（第16表）．ただし，分量の関係から，第16表は7.のODMPPFD重相関（変数増減法）に取り込まれた樹冠形状値に限定した．3.に記したように，樹齢10，15および20年のODMPPFDには総じて $TT \approx SCL > YS > OC > MCL$ の大小関係が認められた（第10表）．一方，多くの樹冠形状値（平均値）の仕立て方法間における大小関係には，偏相関係数が正の場合には上記とほぼ似た大小関係，偏相関係数が負の場合には上記とほぼ逆の大小関係が認められ（第16表），一部に有意差が認められた．たとえば，樹齢15年のODMPPFDに対して正の偏相関係数を有した平均樹冠表面葉ブロック数割合（PSLB）の大小関係はODMPPFDの大小関係にほぼ似ており，一方，負の偏相関係数を有した南北方向葉ブロック平均連続数（MCFNS）の大小関係はODMPPFDの大小関係とほぼ逆であった（第16表）．CDMPPFDについても上記とほぼ類似した傾向が認められた（データ略）．

9. 整枝剪定パラメータの違いが樹冠形状値に及ぼす影響

4.に記したように，同一仕立て方法内でも一部整枝剪定パラメータの選択肢が異なったことでDMPPFDに有意差が見られた（第11表）．この原因を明らかにするため，関連する樹冠形状値（平均値）の比較（t分布検定）を行った（第17表）．ただし，分量の関係から，DMPPFD

に有意差が認められた仕立て方法と整枝剪定パラメータの組み合わせ（第11表）に限り比較した．その上，この比較結果の中から有意差が認められた樹冠形状値のみ抜粋したものである（第17表）．DMPPFDと樹冠形状値の間に見られた相関係数（第14表）の正負の符号に注目しながら第17表を見たとき，樹冠形状値（平均値）の大小関係と整枝剪定パラメータの違いによるDMPPFDの大小関係（第11表）が良く対応していた．すなわち，相関係数が正の場合，樹冠形状値（平均値）の大小関係と整枝剪定パラメータの違いによるDMPPFDの大小関係はよく似ていたが，相関係数が負の場合，逆の大小関係が見られた（第17表）．たとえば，各仕立て方法とも垂主枝数が増えることでDMPPFDが減少したが（第11表），一方，多くの場合，垂主枝数が増えることで閉鎖空間内葉量（NLES）の増大，樹冠表面葉ブロック数割合（PSLB）の減少，各部位の空葉比（REBLB）の減少，各方向の葉ブロック平均連続数（MCF）の増大，各方向の樹冠厚（MCT）の増大などが認められ，いずれも有意差が認められた（第17表）．

10. 樹冠形状値の主成分得点，仕立て方法および光環境良否の序列を用いた118園地の総合評価

最後に，樹冠形状値の主成分分析を実施し，樹冠形状値の主成分得点，仕立て方法および光環境良否の序列を用いた118園地の総合評価を行った．なお，この総合評価は，4つの樹齢ごと，CDMPPFDの序列とODMPPFDの序列の両者で行ったが，分量の関係から，ここでは樹齢15年のCDMPPFDの序列を用いた結果を示す．第18表上に樹齢15年における第1主成分と第2主成分の固有ベクトル（EV），第18表下に8主成分の固有値（EVAL），寄与率（CD）および累積寄与率（CCD）を示した．第1主成分と第2主成分の固有ベクトル絶対値の大きさと正負の符号ならびに樹冠形状値とCDMPPFDの間の相関係数（第14表）から以下の主成分の性質が見出された．すなわち，第1主成分における空隙ブロック数（NEB），上下方向透過度（TPVD）などの樹冠形状値の固有ベクトルが正で大きく，逆に葉ブロック数（NLB），葉ブロック体積割合（PVLB）などの樹冠形状値の固有ベクトルが負で絶対値が大きかったことから（第18表上），第1主成分は隙間の程度を示す主成分と見なされた（寄与率44.16%）．そして，第2主成分における葉塊の大きさ（MVLBA），割り当て空間体積（VSS）などの樹冠形状

Table 16 The comparison of means of several characteristics of canopy shape (CCSs) which were incorporated into the multiple regression of ODMPPFD between the five training systems in the three tree ages. The abbreviations and units of CCSs refer to Table 3 and 4.

10-year										
CCSs	CVNLHC	CVNLEWVC	CVNEBHC	LA1c	LA1a	MLAD	SDLAD	CVLAD	MCTVD	MCT3D
OC	148.31 a ^z	86.25 d	7.75 a	2.71 c	1.30 a	0.04 b	0.08 b	172.95 ab	98.70 d	158.45 a
MCL	149.61 a	113.13 c	7.11 b	3.19 a	1.30 a	0.05 a	0.08 a	169.44 b	109.20 cd	160.96 a
YS	120.12 b	69.62 e	6.20 c	2.99 ab	1.30 a	0.04 b	0.08 ab	182.56 a	124.89 b	154.37 ab
SCL	82.79 d	138.50 b	3.18 d	3.16 a	0.95 b	0.05 a	0.08 b	155.08 d	158.72 a	125.00 c
TT	107.07 c	212.34 a	3.02 d	2.94 b	0.65 c	0.04 c	0.07 c	170.39 b	157.33 a	144.56 b
CCSs	NLES	MCFEW	MAXNLBA	CVNEBA	TP3D	TP45S	TP45N	TP45E	PVCEBQE	PSLBQW
OC	3014.72 b	1.98 ab	8.64 ab	92.57 cd	60.55 e	67.82 e	67.85 c	54.54 e	0.24 b	3.67 c
MCL	3340.61 a	2.05 a	8.77 a	91.35 d	64.84 c	72.27 c	72.21 e	60.63 d	0.28 b	2.77 d
YS	2959.79 b	1.92 b	8.71 ab	97.27 bc	61.26 de	68.04 de	67.20 de	61.96 c	0.39 a	5.74 a
SCL	970.46 c	1.72 c	6.93 c	105.85 a	66.60 b	75.50 b	75.18 b	68.28 b	0.10 cd	4.03 bc
TT	962.89 c	1.87 b	7.60 bc	98.91 b	75.41 a	83.38 a	83.01 a	74.47 a	0.03 d	2.07 e
CCSs	PVEBM	REBLBM	REBLBL	PSLB						
OC	90.24 c	9.35 c	12.20 c	75.23 c						
MCL	89.79 c	8.81 c	17.09 c	72.12 d						
YS	89.69 c	8.76 c	15.43 c	77.82 bc						
SCL	93.12 b	13.70 b	33.47 b	84.19 a						
TT	93.89 a	15.70 a	54.18 a	84.61 a						
15-year										
CCSs	CVNLHC	CVNLNSVC	CVNLEWVC	CVNEBHC	LA1a	MCT45S	MCT45E	NLES	PNLBS	
OC	151.79 a	90.57 b	89.38 de	7.74 a	1.72 a	163.36 b	166.21 c	4,514.5 bc	46.68 ab	
MCL	149.87 a	97.84 b	117.78 c	7.20 b	1.75 a	185.85 b	196.26 b	4,976.5 a	50.56 a	
YS	119.83 bc	127.44 a	74.67 e	6.20 c	1.75 a	191.37 b	195.37 bc	4,326.0 c	43.95 b	
SCL	88.14 d	132.56 a	140.86 b	3.18 de	1.29 b	169.47 b	190.91 bc	1,386.2 e	25.04 d	
TT	110.63 c	125.84 a	223.40 a	3.00 e	0.87 c	255.67 a	216.23 ab	1,558.0 de	31.66 c	
CCSs	MCFNS	MCF45S	MAXNLBA	MNEBA	SDNEBA	TP45N	PVCEBQS	PVCODQN	PVCEBQN	
OC	2.04 ab	1.61 b	8.79 a	5.96 b	5.48 c	68.61 d	0.32 ab	4.58 a	0.40 a	
MCL	2.12 a	1.70 a	10.03 a	5.91 b	5.53 c	72.43 c	0.43 a	4.06 ab	0.29 ab	
YS	2.01 b	1.57 bc	8.71 a	5.67 b	5.42 c	67.78 d	0.18 b	2.89 cd	0.17 bc	
SCL	1.77 c	1.40 d	7.17 b	6.03 b	6.38 b	75.98 b	0.22 b	3.49 bc	0.38 a	
TT	1.94 b	1.53 c	7.70 ab	7.26 a	7.19 a	83.79 a	0.17 b	2.00 d	0.12 c	
CCSs	PVLBM	REBLBM	PSLB							
OC	9.15 b	10.03 c	73.66 b							
MCL	10.33 a	8.76 c	70.87 b							
YS	10.22 a	8.87 c	76.85 b							
SCL	7.03 c	13.37 b	84.20 a							
TT	6.03 d	15.95 a	82.99 a							
20-year										
CCSs	HCB	CVNLHC	CVNEBSNVC	LA1a	CVLAD	MCTNS	MCT45E	NLES	PVOEBQS	MCF45E
OC	21.77 b	149.49 a	4.53 c	1.95 a	207.20 a	195.83 a	161.80 c	5068.4 b	1.64 bc	1.06 b
MCL	28.58 ab	148.56 a	4.76 c	1.95 a	213.94 a	187.50 ab	195.02 ab	5759.7 a	1.72 a	1.13 ab
YS	14.97 c	124.43 bc	6.86 a	1.95 a	217.79 a	152.18 c	187.63 ab	5281.0 b	1.65 b	1.08 b
SCL	20.00 bc	92.69 d	5.06 bc	1.43 b	205.03 a	110.65 d	185.49 b	1905.5 c	1.45 d	1.11 ab
TT	33.02 a	114.98 c	3.36 d	0.97 c	212.01 a	169.49 bc	214.60 a	1902.1 c	1.57 c	1.15 a
CCSs	MCF45W	SDNLBA	MVEBA	SDNEBA	TPVD	TP45N	TP45W	PVOEBQN	PVOEBQN	PVCEBQW
OC	1.63 a	1.28 ab	0.04 b	5.39 c	54.02 e	68.55 d	68.80 d	2.94 ab	86.03 b	0.39 c
MCL	1.69 a	1.35 a	0.04 b	5.51 c	59.14 cd	71.74 c	68.84 d	2.55 b	86.47 b	0.31 cd
YS	1.68 a	1.29 ab	0.04 b	5.56 c	58.71 d	67.76 d	72.57 c	3.09 ab	91.90 a	0.66 a
SCL	1.44 c	1.20 b	0.03 c	6.41 b	71.19 b	75.61 a	75.11 b	2.72 b	87.56 b	0.48 b
TT	1.54 b	1.21 b	0.05 a	7.10 a	79.22 a	83.44 a	79.79 a	1.53 c	91.93 a	0.20 d
CCSs	REBLBQS	REBLBQN	REBLBQW	PSLBQW						
OC	14.97 bc	16.20 c	10.93 de	70.16 cd						
MCL	12.32 c	15.12 c	16.22 b	66.35 d						
YS	24.07 a	34.70 a	9.16 e	72.55 bc						
SCL	22.59 a	17.75 c	13.98 c	77.94 a						
TT	21.69 a	23.41 b	21.16 a	76.64 ab						

^zDifferent letter indicates significance at 5% level by Tukey's multiple range test.

Table 17 The comparison of several characteristics of canopy shape (CCSs) between values of parameters for training-pruning (VPTPs) of each combination of training system in the three tree ages. The numbers of trees per the parameter in each training system refer to Table 11. The abbreviations of CCSs and that of training-pruning parameters refer to Table 3 and 4 and Table 1, respectively.

OC in 10-year		NSSB		TT in 10-year		DPPSBL		SCL in 15-year		NSSB	
CCSs \ VPTP	3	5	CCSs \ VPTP	EL	BL	CCSs \ VPTP	EL	BL	CCSs \ VPTP	1	2
MCTVD	94.51	105.35 * ^z	PSLBQW	77.24	81.66 **	LAO				3.73	3.36 *
MCF45W	67.54	69.16 *	NLES	1056.63	882.09 *	MLAD				0.07	0.07 *
PVCCSQS	4.39	3.39 *	PNLES	28.91	24.13 *	PVLBU				3.28	2.60 *
PVCODQS	5.82	4.32 *	MCFEW	1.92	1.83 *	RELBL				31.44	42.59 *
MCL in 10-year		DPPSBL		MCF45W		TT in 15-year		DPPSBL			
CCSs \ VPTP	EL	BL	PSLB	83.29	85.86 *	CCSs \ VPTP	EL	BL			
NLES	3167.16	3482.14 **	TT in 10-year		NSSB		MCT45N		232.40	204.64 **	
PNLES	43.32	47.63 **	CCSs \ VPTP	2	3	TT in 15-year		NSSB			
MCFVD	1.95	2.03 *	MCT3D	139.71	151.00 *	CCSs \ VPTP	2	3			
MCF45S	1.57	1.64 **	NLES	884.03	1055.24 *	MCT45S	222.51	297.78 **			
MCF45W	1.56	1.63 *	PNLES	24.18	28.87 *	PNLES	28.81	34.37 *			
TP45S	71.30	72.89 *	MCFEW	1.82	1.92 *	PVEBQE	98.93	98.58 **			
PVCCS	2.75	2.33 *	MCFVD	1.76	1.86 *	RELBLQE	99.31	72.67 **			
PVCCSQW	3.27	2.33 **	PVLBL	2.66	1.57 **	NLES	1417.78	1691.24 *			
PSLBQW	73.83	66.90 **	PVLBM	94.24	93.48 *	OC in 20-year		NSSB			
PSLB	73.88	70.83 **	RELBLQW	27.37	22.01 *	CCSs \ VPTP	3	5			
YS in 10-year		NSSB		MCF45N		MCF45E		1.04		1.10 *	
CCSs \ VPTP	3	5	MCF45E	1.04	1.18 **	PVLB			5.81	6.25 *	
CVNEBHC	5.46	6.78 **	PVCCSQS	2.72	1.79 **	CVNEBVC			415.37	413.42 *	
CVNEBEWVC	2.89	3.76 **	PVLBQE	0.97	1.29 *	NLB			538.14	579.20 *	
NLES	2787.84	3171.70 *	PVEBQE	99.03	98.71 *	NEB			8721.86	8680.80 *	
PNLES	38.13	43.38 *	OC in 15-year		NSSB		PVLBM		7.96	9.69 **	
MCF45S	1.49	1.59 *	CCSs \ VPTP	3	5	PSLB		74.95	71.66 *		
SDNEBA	5.20	5.53 *	MCFNS	2.00	2.13 **	MCL in 20-year		DPPSBL			
PVCEBQE	0.20	0.52 *	NEB	8745.14	8701.80 *	CCSs \ VPTP	EL	BL			
PVLBU	1.28	0.44 *	RELBL	12.43	10.67 *	LAO			6.92	6.33 *	
PVLBU	5.31	7.07 **	PSLB	75.92	70.59 *	LAIc			4.53	4.95 **	
PVEBL	94.69	92.93 **	MCT45S	222.51	297.78 **	NLES			5493.60	6058.25 **	
RELBL	17.89	13.49 **	NLES	1417.78	1691.24 *	PNLES			50.09	55.24 **	
PSLBQE	79.35	73.61 *	PNLES	28.81	34.37 *	PSLB			70.97	68.50 *	
PSLBQW	78.48	73.33 *	MCL in 15-year		DPPSBL		MCT45E		207.00	186.17 *	
PSLB	80.63	75.38 **	CCSs \ VPTP	EL	BL	PVOEBQS		84.86	82.68 *		
YS in 10-year		DPPSBL		LAO		PVEBQS		13.79		11.06 **	
CCSs \ VPTP	EL	BL	MCFNS	2.07	2.19 **	YS in 20-year		NSSB			
CVNEBEWVC	3.06	3.84 *	MCF45S	1.66	1.74 *	CCSs \ VPTP	3	5			
MNLBA	1.92	2.00 *	PVCCS	2.57	2.24 *	MNLBA			1.98	2.05 *	
SDNLBA	5.28	5.58 *	PVCCSQW	2.88	2.22 *	MVLBA			0.01	0.01 *	
PVLBM	10.82	9.43 **	YS in 15-year		NSSB		PVCEB		0.26	0.38 *	
PVLBU	5.65	7.41 **	CCSs \ VPTP	3	5	MCT3D		144.30	174.53 **		
PVEBM	89.18	90.57 **	MCTVD	112.40	140.47 *	MCT45N		164.47	193.96 *		
RVLBL	94.35	92.59 *	MCFEW	1.93	2.01 *	MCFEW		1.96	2.13 **		
RELBLM	8.26	9.65 **	PVCEB	0.23	0.43 *	PVLBU		1.27	0.38 *		
RELBL	16.86	12.83 *	PVLBU	1.46	0.57 *	PVEBL		98.73	99.62 *		
PSLBQW	81.05	75.02 **	PVLBL	5.83	7.22 *	PSLBQW		75.80	69.37 *		
SCL in 10-year		DPPSBL		PVEBL		PSLBQE		80.60		70.68 **	
CCSs \ VPTP	EL	BL	PVCEBQE	0.17	0.58 *	PSLB		79.36		72.62 **	
MAXLAD	0.73	0.64 *	PSLBQS	83.94	76.05 **	TT in 20-year		DPPSBL			
NLES	1047.05	904.38 *	RELBL	16.30	13.16 *	CCSs \ VPTP	EL	BL			
PNLES	25.46	21.99 *	PSLBQW	77.36	71.38 *	MCFNS			2.04	1.94 *	
CVNEBA	104.30	107.32 *	PSLB	80.52	74.05 **	MCFEW			2.02	1.89 *	
PSLBQW	84.18	88.35 *	PSLBQE	80.76	71.81 **	MCF45E			1.23	1.08 **	
SCL in 10-year		NSSB		YS in 15-year		DPPSBL		PSLBQW		74.40	
CCSs \ VPTP	1	2	CCSs \ VPTP	EL	BL	MCF45N		1.63		1.51 **	
MCT3D	131.38	119.84 *	NLES	41.54	48.74 *						
MAXNLBA	6.46	7.33 *	PNLES	4088.60	4796.47 *						
PVEBM	93.45	92.88 *	MCF45E	1.02	1.08 *						
RVLBQW	15.94	13.94 *	RELBL	16.52	12.01 **						
						PVLBL		5.74		7.76 **	
						PVEBL		94.26		92.24 *	

* and ** indicates significance at 5% and 1% level by t-distribution test, respectively.

値の固有ベクトルが正で大きく、逆に樹冠表面陥没体積割合 (PVCCS)、上部空隙ブロック体積割合 (PVLBU) など樹冠形状値の固有ベクトルが負で絶対値が大きかったことから (第18表上)、第2主成分は樹冠の大きさや厚さを示す主成分と見なされた (寄与率17.23%)。第3主成分から第8主成分までの寄与率はそれぞれ数%のレベルであり、第8主成分までの累積寄与率は83.36%であった (第18表下)。他の樹齢における第1主成分と第2主成分の固有ベクトルにもほぼ類似した傾向が見られた (データ略)。なお、樹齢5、10および20年における第1主成分と第2主成分の寄与率は、それぞれ、36.39%と14.9%、43.57%と16.84%および43.37%と15.75%であり、また、第8主成分までの累積寄与率は、それぞれ、79.4%、82.42%および83.23%であった。

樹齢15年、118園地の第1主成分得点と第2主成分得点からなる二次元分布図 (第15図) に、各園地のCDMPPFD序列番号と仕立て方法のシンボルを付した。その結果、118園地は、おおよそ仕立て方法ごとにまとまって分布した。さらに、南北樹幅制限×東西樹幅制限が3m×3mであった細形主幹形仕立て (SCL) の樹は第2主成分得点が小さいところに分布し、4m×4mであった変則主幹形仕立て (MCL) および4m×2mであったトレリス誘引仕立て (TT) の樹は第2主成分得点が高いところに分布した (第15図)。ただし、4m×4mであったY字形仕立て (YS) の樹は第2主成分得点が細形主幹形仕立て (SCL) にやや似たところに分布し、4m×4mであった開心形仕立て (OC) の樹は第2主成分得点の中間的なところに分布した (第15図)。Y字形仕立て (YS) や開心形仕立て (OC) の樹は南北樹幅制限と東西樹幅制限が大きかったにもかかわらず、樹冠内に大きな、かつ、まとまった空隙が存在したため、樹冠の実質的な厚さは変則主幹形仕立て (MCL) より小さかったためである。

次に第1主成分得点に目を向けると、第1主成分得点が最も大きいところにトレリス誘引 (TT) の樹が分布し、2番目に大きいところに細形主幹形仕立て (SCL) の樹が分布し、最も小さいところに残り3つの仕立て方法の樹が分布した (第15図)。けれども、いずれの仕立て方法でも、集中分布することなく、やや広く分布した (第15図)。

仕立て方法を無視したまま第15図全体を観察すると、第1主成分得点が高いほどCDMPPFDの序列が高い傾向が認められた。しかも、仕立て方法ごと観察すると、

第2主成分得点が高いほどCDMPPFDの序列が高い傾向が認められたが、この関係から外れるものも多く認められた (第15図)。なお、この関係から外れる事例については考察で検討した。

ODMPPFDの序列を加味した二次元分布図、あるいは樹齢10年と樹齢20年における二次元分布図にもほぼ似た傾向が見られた (データ略)。

考 察

1. 樹冠形状値に関する考察

果樹園の光環境や光合成に関する従来の研究手法、あるいは、筆者が用いたモデル手法の有効性等については、これらを詳しく論じた前報 (山本, 2014) を参照されたい。ここでは、新たに導入した多くの樹冠形状値について考察したい。

果樹の形状的特徴を示すものとして、樹冠の写真や樹形のスケッチのほかに、多値データとしての2次元的な葉量分布図 (Jackson, 1968) や生産構造図 (小野, 1985) が使用されている。また、単値データとしては、これまでにLAI (Denholmら, 1982; Jackson, 1968; Heinicke, 1969; 倉橋, 1997; 盛岡・八幡, 1981; 塩崎・菊池, 1988; 橘, 1990)、樹高 (浅田, 1988; Ferree, 1980; 盛岡・八幡, 1981; 塩崎・菊池, 1988)、幹断面積 (Ferree, 1980; Johnson・Weinbaum, 1987; Mikaら, 1983; 外崎ら, 1990)、樹冠占有面積または樹冠占有面積率 (荒木・中岡, 1982; 浅田, 1988; 倉橋, 1997; 橘, 1990; 外崎ら, 1990)、樹冠の厚さ (塩崎・菊池, 1988; 外崎ら, 1990)、樹冠容積 (荒木・中岡, 1982; Ferree, 1980; 外崎ら, 1990)、樹冠半径または直径 (塩崎・菊池, 1988; 浅田, 1988)、幹長 (浅田, 1988)、樹幅 (Ferree, 1980)、総葉面積 (倉橋, 1997; 塩崎・菊池, 1988)、方向別平均樹冠断面積 (塩崎ら, 1995) など約10種類が認められる。ただし、これらの多くは果実生産性、樹勢、樹相、管理作業の省力化などに関連して調査され、受光態勢に関連したものは少ない。加えて、実計測における計測労力の関係上、調査樹数も少なく、グリッドの目が粗い測定を余儀なくされたものと考えられる。

上記の実計測法に比べ、本報における樹冠形状値の算出方法 (モデル手法) には以下の特徴があると考えられる。すなわち、樹冠を細かい目のグリッドで仕切るため計測精度が高く、葉量の3次元配列変数を用いたプログ

Table 18 The upper part indicates the eigenvectors (EVs) of the first principal component (left) and the second one (right) from the principal component analysis of characteristics of canopy shape (CCSs) in 15-year of tree age. The lower part shows the eigenvalues (EVAL), the coefficients of determination (CD) and the cumulative coefficients of determination (CCD) to the eighth principal component (PC).

CCSs	First principal component		Second principal component				
	EV	CCSs	EV	CCSs	EV	CCSs	EV
NEB	0.1416	CVNLBA	-0.0384	MVEBA	0.1966	RELBLB	0.0303
MNEB	0.1416	PVCODQN	-0.0387	MVLBA	0.1803	TP45E	0.0299
TPVD	0.1394	PVLBQN	-0.0459	VSS	0.1770	LAIc	0.0290
PVOEB	0.1337	PVEBQW	-0.0476	ASLC	0.1770	TPVD	0.0289
TP45E	0.1322	PVCCSQW	-0.0477	MCF45N	0.1687	TP45W	0.0269
PVEBL	0.1312	ASLC	-0.0483	MCF45S	0.1643	MAXLAD	0.0269
PVEBM	0.1311	VSS	-0.0483	TPNSD	0.1642	RELBLU	0.0236
TP45W	0.1308	MCT3D	-0.0521	MCFNS	0.1639	LAO	0.0224
TP45N	0.1306	MAXLAD	-0.0579	MCFVD	0.1624	PVLBL	0.0169
SDNEBA	0.1292	PVCEBQS	-0.0580	PVEBU	0.1563	PVLBM	0.0159
TP45S	0.1289	SDNLBA	-0.0599	CVNLHC	0.1479	PVEBQN	0.0044
RELBLM	0.1278	MCF45N	-0.0602	MCFEW	0.1435	PVCODQS	0.0026
CVNLEWVC	0.1269	MVLBA	-0.0613	SDNLBA	0.1414	RELBLQN	0.0023
TP3D	0.1259	MAXNLBA	-0.0658	MCFNS	0.1402	RELBLM	-0.0026
PVOEBQE	0.1257	MCTSN	-0.0671	PVOEBQW	0.1374	PVLBQN	-0.0044
PVEBQE	0.1205	PVLBU	-0.0692	MNLBA	0.1364	SDLAD	-0.0086
RELBLB	0.1159	MCFVD	-0.0709	TPEWD	0.1326	PVEBM	-0.0159
RELBLQE	0.1153	MNLBA	-0.0714	PNLES	0.1265	PVEBL	-0.0169
PSLB	0.1115	MCFNS	-0.0731	MCF45W	0.1246	LAIa	-0.0190
MCTVD	0.1026	MCF45S	-0.0745	MCF45E	0.1213	MCTVD	-0.0199
PVOEBQS	0.1017	PVCCSQS	-0.0748	MNEBA	0.1212	TH	-0.0218
MNEBA	0.0985	PVLBQS	-0.0798	MCT3D	0.1203	PVCEBQE	-0.0278
PSLBQS	0.0976	PVCEBQN	-0.0808	CVNLBA	0.1179	VLB	-0.0326
PSLBQE	0.0954	PVCEBQE	-0.0819	RELBLQE	0.1177	NLB	-0.0326
PSLBQW	0.0951	CVNEBNSVC	-0.0821	PVEBQW	0.1128	PVOEBQS	-0.0358
TPNSD	0.0943	PVLBQW	-0.0855	MCT45S	0.1115	PVLBQE	-0.0365
RELBLQW	0.0895	MCFEW	-0.0863	HCB	0.1067	PVCODQE	-0.0396
CVNLNSVC	0.0884	TWNS	-0.0867	TP3D	0.1047	TWEW	-0.0422
PVCEBQN	0.0855	PVCODQW	-0.0879	MCT45N	0.1009	PVCODQN	-0.0484
PSLBQN	0.0850	NEBA	-0.0888	PVLBQS	0.0985	PVCCSQS	-0.0518
PVOEBQW	0.0825	PVCCS	-0.0928	MAXNLBA	0.0984	MLAD	-0.0536
PVEBQS	0.0798	MCF45W	-0.0981	TP45S	0.0898	PVCEB	-0.0576
TPEWD	0.0716	PVCEB	-0.0982	CVNLEWVC	0.0878	PVCEBQN	-0.0690
PVEBU	0.0692	CVNLHC	-0.0984	NLES	0.0853	CVNLNSVC	-0.0690
RELBLQS	0.0690	MCTEW	-0.0991	TWNS	0.0840	PSLBQE	-0.0693
CVNEBA	0.0674	PVCCSQE	-0.1019	PVOEB	0.0790	NLBA	-0.0739
MCT45S	0.0646	PVCODQS	-0.1022	TP45N	0.0774	RELBLQS	-0.0796
PVOEBQN	0.0622	PNLES	-0.1086	CVNEBEWVC	0.0746	PSLBQN	-0.0959
LAIc	0.0526	PVLBQE	-0.1205	MCT45W	0.0729	PVEBQS	-0.0985
MCT45E	0.0509	PVCODQE	-0.1229	RELBLQW	0.0688	PVCCSQE	-0.0989
MCT45W	0.0500	NLES	-0.1297	CVNEBHC	0.0664	PVCODQW	-0.1006
PVEBQN	0.0459	TWEW	-0.1307	MCT45E	0.0607	PVCEBQW	-0.1077
MCT45N	0.0401	PVLBM	-0.1311	PVOEBQN	0.0586	PSLBQW	-0.1079
MCF45E	0.0390	PVLBL	-0.1312	PVOEBQE	0.0560	CVNEBNSVC	-0.1107
TH	0.0387	NLBA	-0.1334	PVLB	0.0541	PVLBQW	-0.1128
RELBLQN	0.0314	CVNEBHC	-0.1347	CVLAD	0.0534	PSLB	-0.1146
CVNEBEWVC	0.0292	VLB	-0.1357	MCTEW	0.0519	PVCCSQN	-0.1209
MVEBA	0.0259	NL	-0.1379	SDNEBA	0.0417	PSLBQS	-0.1217
HCB	0.0033	MNLC	-0.1379	MNLC	0.0397	NEBA	-0.1251
MLAD	-0.0019	LAIa	-0.1379	NL	0.0397	CVNEBA	-0.1314
RELBLU	-0.0139	LAO	-0.1381	PVCEBQS	0.0390	PVCCS	-0.1557
SDLAD	-0.0253	PVLB	-0.1416	PVEBQE	0.0365	PVLBU	-0.1563
CVLAD	-0.0299	NLB	-0.1416	NEB	0.0326	PVCCSQW	-0.1729
PVCCSQN	-0.0304			MNEB	0.0326		
PC	EVAL	CD(%)	CCD(%)				
First PC	48.14	44.16	44.16				
Second PC	18.78	17.23	61.40				
Third PC	8.36	7.67	69.06				
Fourth PC	4.28	3.93	72.99				
Fifth PC	3.95	3.62	76.61				
Sixth PC	3.14	2.88	79.49				
Seventh PC	2.18	2.00	81.49				
Eighth PC	2.03	1.87	83.36				

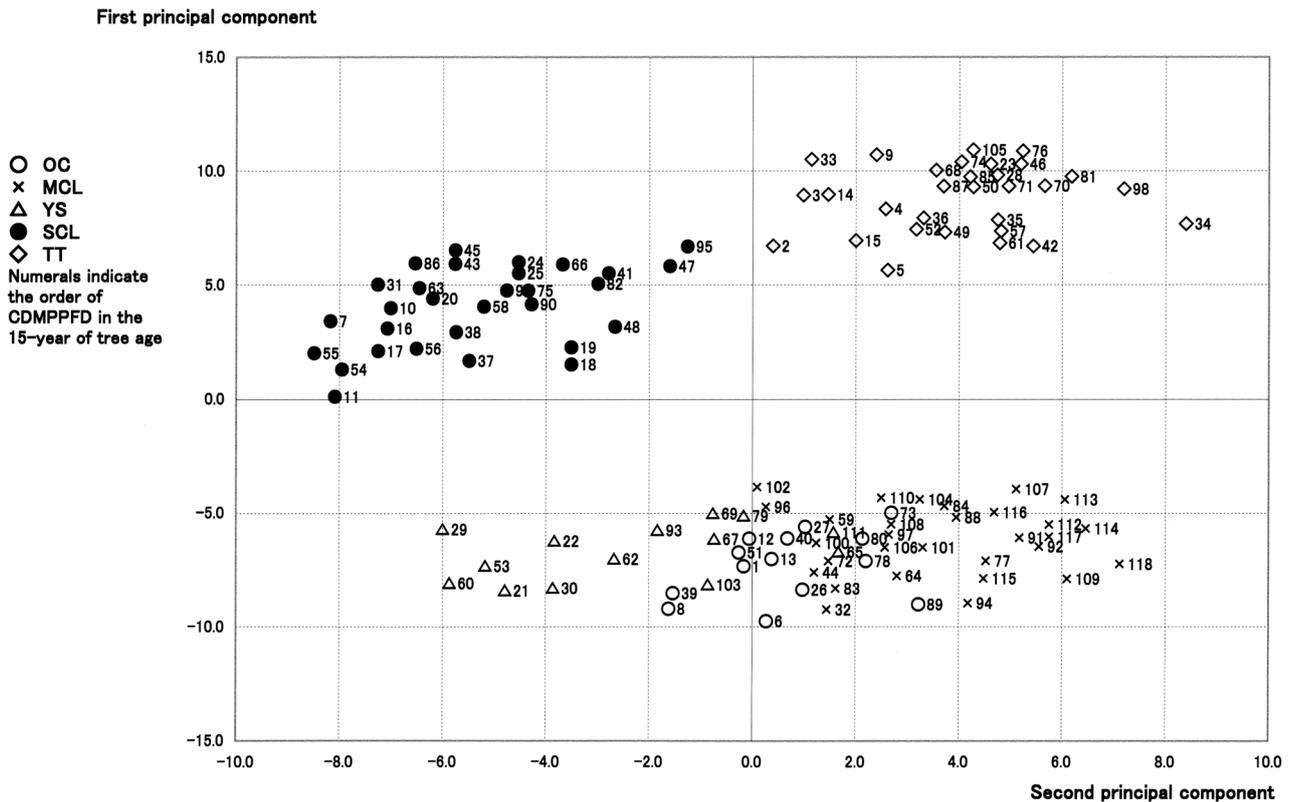


Fig. 15 The distribution of scores of the first principal components (the vertical axis) and the second principal components (the horizontal axis) of the 118 orchards which were expressed using five symbols of the training systems and the order of CDMPPFD in the 15-year of tree age.

ラム計算が可能で、樹冠形状を多種多様な側面（切り口）から捉えることができると考えられる。とは言い、本実験で扱った樹冠形状値群が樹冠形状の全てを表現し尽くしているものではないことを断っておきたい。

ところで、単値データと異なり、葉量の3次元配列変数（多値データ）は、樹冠の形状的特徴を示す信頼できる数値データである。ちなみに、本実験では要素数が 21^3 個からなる配列データを用いたものである。また、視角を変えた樹形図や樹冠形図のような画像データも樹冠の形状的特徴を示す。ただし、多値データや画像データは相関分析などの統計処理に馴染まない。

以下、本報で扱った樹冠形状値の特徴、性格、問題点などを個別に述べてみたい。

南北厚平均値（MCTNS）、東西厚平均値（MCTEW）、上下厚平均値（MCTVD）、3方向厚平均値（MCTD）および4方向にける45度斜下方向の厚さの平均値（MCT45S, MCT45N, MCT45EおよびMCT45W）は方向別にとらえた実質的な葉層の厚みを表わすため、光の浸透現象にとって極めて重要な要因と考えられる。しか

し、散乱光や直射光は様々な入射角度を有するので、上記の限られた数の方向に沿った厚さだけでは不十分であると考えられる。さらに、樹冠形状値の多くで、グリッドを上部、中間部および下部の3領域、あるいは、南側、北側、東側および西側の4領域に分けて算出した。しかしながら、領域はさらに細分化できるため、上記7領域だけでは不十分であると考えられる。ただし、方向や領域の数を増やし、樹冠形状値数が増えた場合、本実験における標本数（118個の樹数）を超えてしまい、主成分分析や重回帰分析が実行できなくなることを考慮し、上記の数に絞ったことを断っておきたい。

ところで、葉ブロック体積割合（PVLB）のように、割り当て空間体積に占める割合として表現されたほとんどの樹冠形状値は極めて低い値（1桁台の%）になった（第12表）。一方、割り当て空間体積に占める空隙ブロック体積の割合で表現されたほとんどの樹冠形状値（たとえば、PVEBQSなど）は極めて高く、80%台や90%台になった（第12表）。この理由は、グリッドのブロック総数が9261個であったのに対し、樹齢が高いときでも葉ブ

ロック総数は約430個ほどであったことによる。要するに、果樹の葉層は、割り当て空間中では極めて疎であったことの反映である。

数値表現が変動係数で表わされた樹冠形状値（たとえば、CVNLHCなど）は、樹冠あるいはグリッドにおける葉層あるいは空隙などのばらつきの程度を意味する。けれど、これらのばらつきの程度と光浸透との関係については未解明な部分が多く、今後検討を要する。

ところで、樹冠表面陥没空隙は樹冠表面の凹凸で生じるもので、立木仕立ての栽培果樹の樹冠ではしばしば見られる。陥没空隙の多少と光浸透は無関係ではない。何故ならば、同じ体積の葉層でも、凹凸が少なく単純に重なった葉層は結果的に厚くなり、反対に凹凸が多い葉層は薄くなるためである。また、同じ陥没でも上方向や横方向に開いた陥没と下方向に開いた陥没とでは光浸透の仕方が異なると考えられるが、今後検討したい。

本研究で新たに提起した樹冠表面葉層割合に関連した樹冠形状値（たとえば、PSLBなど）は、DMPPFDとの間に高い正の相関関係を有し（第14表）、重相関においても重要な説明変数であった（第15表）。樹冠表層部の葉層は直射光が当たれば日向部分として強く受光する。また、日陰部分であっても、地面方向に面しない樹冠表層部であれば、天空散乱光を強く受光する。一方、樹冠内部の葉層は絶えず弱光下に置かれる。よって、葉量と同じでも、樹冠表面葉層割合が高くなるような樹冠形は受光態勢の改善にとって極めて有利であると考えられる。

2. 解析結果に関する考察

樹高や葉量が異なれば光環境は大きく変わるが、樹高や園地LAIが等しい条件下、仕立て方法や樹冠形を変えることで、果樹園光環境にどれだけの違いが生じるかについてはこれまで全く明らかにされていない。第5表および第6表に示したように、118園地における光環境の変動の大きさが明らかにされ、中には相当な違いが生じることが見出されたことの意義は極めて大きい。果樹の光合成を積極的に高める栽培手段に乏しい中（山本, 2014）、受光態勢の改善による光合成作用改善の可能性が示唆されるからである。

118園地における光環境良否の序列関係を明らかにすることは、受光態勢良好な仕立て方法や樹冠形状を検討するうえで重要である。各データの順位表（第8表）お

よび順位相関係数の表（第9表）から、樹齢10年以降において、序列上位の樹は樹齢が異なっても総じて上位であり、序列下位の樹は樹齢が異なっても総じて下位であるものと考えられる。なお、第7表の単相関係数に比べ、順位相関係数（第9表）が少し減少した理由として、順位データにおける直近の差は1に等しく、よって、数値データの差に比べてやや不正確になり、分散が増大したことが考えられる。また、樹齢が異なったことで序列が変動した理由として以下のことが考えられる。すなわち、CDMPPFDなどの序列の近接した樹の間では、その数値差が元々僅かであったこと（第14図）に加え、CACOASの整枝剪定プロセスにおける樹形や樹冠形の年変化、このための光環境の変化なども起き、結果的に序列が少し変化したことが考えられる。

仕立て方法による果樹園光環境の改善効果は、栽培者の関心の最も高いものの一つであるが、詳細な調査は極めて少ない（鈴木ら, 1973）。5仕立て方法間のCDMPPFDおよびODMPPFDの比較結果（第10表）から、ほぼ同一の園地LAIでありながら、仕立て方法の違いにより果樹園光環境の明瞭な違いが生じたこと、ならびに、その原因として一部の樹冠形状値の違いが関与したこと（第16表）が確認できたことの意義は極めて大きいものと考えられる。

なお、本報で「ほぼ同一の園地LAI」と記した理由は、材料および方法の2.に記したように、細形主幹形（SCL）およびトレリス誘引仕立て（TT）に設定された園地LAIに系統誤差を伴ったからである。前報（山本, 2014）に記した園地LAIとCDMPPFDの関係曲線を用いて、園地LAIの系統誤差によるCDMPPFD値の過大評価の程度を推定したところ、それぞれ、0.82%および1.28%の過大評価であった。したがって、第10表の結果に及ぼす上記系統誤差による影響は極めて小さいと考えられる。

同一仕立て方法においても、整枝剪定方法を変えることで果樹園光環境を改善できれば、整枝剪定技術にとって有益な情報になりうる。第11表に記したように、主枝当たりの垂主枝数、主枝長分布、主枝分岐角度分布など、一部整枝剪定パラメータの選択肢の違いによりCDMPPFDおよびODMPPFDにおいて有意差が現れ、その原因として一部の樹冠形状値の違いが関与したことが見出された（第17表）。実際の果樹園におけるこの種の比較試験は限りなく実施困難である（山本, 2014）ことを考えると、本結果は整枝剪定技術にとって貴重な情

報になろう。

主成分分析と因子分析は非常に類似した手法である。どちらも数多くの観察変数から少数の潜在変数（前者では主成分、後者では因子）を作る（奥野ら, 1974）。因子分析は総合的評価に関連する潜在変数を作成できないが、観察変数群を互いに重複しない少数の因子に振り分ける利点を有し、その解釈は比較的容易である。ちなみに本報においても、樹冠形状値によるCDMPPFDあるいはODMPPFDの重相関分析結果を少数の因子を用いて解釈するときに有効であった（結果の7.を参照）。主成分分析から作られる潜在変数（主成分）は総合的評価という拡張機能を有し、すでに述べたように、仕立て方法や光環境などの序列と関連付けた118樹の総合特性値の分布図（第15図）を作成することができた。ただし、各主成分とも、全ての樹冠形状値を用いて表現されるため、その内容を解釈することが困難な場合もあった。

樹齢が低いほど因子が細かく分かれたのに対し、樹齢が高いと因子数が減った理由として、樹齢の進行に伴い割り当て空間内に枝葉が充満し、樹冠形状値間の相関が一層高まり、因子分別が困難になったことが考えられる。また、最終的累積寄与率がいずれの樹齢でも約80%であったことは、樹冠形状値の収集がまだ不十分であったことを意味する。

樹冠形状値とCDMPPFDあるいはODMPPFDの間に見られた単相関（第14表）および重相関（第15表）の結果には、受光態勢を解明するうえで、重要な内容を含むものと考えられる。特に、因子分析で分類された全ての因子にまたがって、各因子に含まれる代表的な樹冠形状値が重相関の説明変数に取り込まれたこと（変数増減法）、およびこのときの決定係数が極めて高かったこと（第18表）は重要である。ただし、CDMPPFDあるいはODMPPFDの変動の数%から約10%がこれらの樹冠形状値だけでは説明できなかったことについては今後さらに検討を要する。

主成分得点の二次元分布図（第15図）に見られたように、個々の園地は樹冠内隙間の多少（第1主成分）と樹冠葉層の厚さ（第2主成分）の2主成分に大きく影響されて分布した。この場合、第1主成分得点が高いほどおよび第2主成分が小さいほど光環境が良好になる。また、この2要因は仕立て方法や整枝剪定方法の違いからもたらされることが推測された。たとえば、序列118位の樹の第2主成分得点は非常に大きいことに加え、第1主成分

得点は小さかった。とは言え、上記関係から外れる事例も見られ、たとえば、序列1位の樹の第1主成分得点は小さく、第2主成分得点は中間的であった（第15図）。このほか、たとえば、第2主成分得点が小さく、第1主成分得点が中間的なところに序列55位や54位の樹が分布したものの、その極く近い所に序列7位や11位の樹が分布した（第15図）。したがって、樹冠形状値のような単値データを用いた解析手法だけでは受光態勢を完全に解明することは難しいものと考えられる。

3. 今後の研究に向けて

前報（山本, 2014）および本報の研究成果は、多くの重要な知見を含んでいた。しかし、緒言に記した本研究の戦略的目標（受光態勢の解明とこれに基づくideal crownの創出）に照らした場合、まだその緒についたばかりと言える。その理由として以下の2点が考えられる。1つは、本実験の調査対象が仕立て方法と整枝剪定パラメータを組み合わせて出来た既存の樹形に限られ、結果的に葉層の三次元分布の自由度が小さかったことである。このことは本報で見られた光環境の変動範囲の狭さの原因の一つと言えよう。既存の仕立て方法は特殊な歴史的経緯から生まれ、あるいは様々な栽培目的から考案されており、受光態勢の改良が特別重視されたものではない。もう1つは、本報の解析に用いた樹冠形状値が集計値（単値データ）にすぎないことである。樹冠形状値に関する情報を寄せ集めるだけではideal crown創出にたどり着くのは難しい。ほぼ同一の樹冠形状値に対して多数の異なるソリッドモデル、あるいは、異なる光環境が存在することも十分考えられる。言わば、集計値が似ていても、樹冠葉層の立体的構造や光環境には多様性を伴うことである。さらに、樹冠形状値に反映しない少量の葉層であっても、光線の方向や時刻によって光環境が変わる複雑性がある。よって、集計値（単値データ）のみではこれらの多様性や複雑性を十分説明できないと考えられる。

上記の2点をふまえ、今後の研究においては、以下の発想の転換が必要であろう。すなわち、小さい自由度をもたらす樹形から出発せず（CACOASによらず）、別手法により、大きい自由度を有する数多くの樹冠葉層分布の三次元構造（樹冠形）を準備する。さらに、OLEASを用いて光環境を比較したうえで、選抜された光環境良好なものについて、その樹形作りを試みることである。そ

の際、本報で使用した樹冠形状値は選抜結果の解析と確認のための補助的手段として活用できるだろう。

摘 要

モデル手法を用いて、5種類の仕立て法と幾つかの整枝剪定パラメータの選択肢を組み合わせ、合計118個のリング‘ふじ’の樹を構築し、これらを配植した合計118個の果樹園を対象に、その光環境のシミュレーション実験を行った。その結果、園地LAIがほぼ等しいにもかかわらず、118園地の光環境に変動が見られた。樹齢15年と20年の7月下旬における晴天日平均葉面PPFD (CDMPPFD) および曇天日平均葉面PPFD (ODMPPFD) における最大差の割合は約32%であった。CDMPPFDおよびODMPPFDの順位相関分析から、樹齢10年以下においては、樹齢が異なっても序列上位の樹は総じて序列上位であり、序列下位の樹は総じて序列下位であることが示唆された。5仕立て方法間のCDMPPFDおよびODMPPFDに関する多重比較検定を行ったところ、樹齢10、15および20年のCDMPPFDには総じてトレリス誘引(TT) ≡ 細形主幹形(SCL) ≡ 開心形(OC) > ≡ Y字形(YS) > 変則主幹形(MCL)の大小関係、ODMPPFDには総じてTT ≡ SCL > YS > ≡ OC > MCLの大小関係が認められた。同一仕立て方法内の樹に限定し、各整枝剪定パラメータ値(2選択肢)ごとに分け、CDMPPFDおよびODMPPFDの平均値を比較したところ、主枝当たりの垂主枝数などの幾つかの整枝剪定パラメータ値の違いにより有意差が認められた。次にCACOASの樹冠解析項目を増やし、合計107個の樹冠形状値を算出した。4つの樹齢における全樹冠形状値を用いて因子分析を行ったところ、割り当て空間内の空隙因子、樹冠葉層の厚さ因子、樹冠の北側形状因子、樹冠南側形状因子、樹高因子、葉面積密度因子、LAI因子、葉量の垂直分布因子、葉塊因子、樹冠内部空隙因子に分けられた。樹冠形状値とCDMPPFDおよびODMPPFDとの間には高い正負の単相関関係が広範囲に認められた。さらに、重相関関係を調査したところ、因子分析で分類された全ての因子にまたがって樹冠形状値が説明変数に取り込まれ(変数増減法)、118個の園地におけるCDMPPFDおよびODMPPFDの変動の約90%以上を説明できた。仕立て方法の違いあるいは整枝剪定パラメータの違いによる光環境の改善効果は、上記の違

いに付随した樹冠形状値の違いにより良く説明できた。樹冠形状値の主成分分析を実施し、仕立て方法や光環境の序列などの情報を加味した118園地の総合評価を行った。その結果、118園地は、仕立て方法ごとに分布するとともに、第1主成分(割り当て空間における隙間の程度)の得点が大きく、かつ、第2主成分(樹冠の大きさや厚さの程度)の得点が小さいほどCDMPPFDの序列順位が高い傾向が認められた。しかし、上記関係から外れるものも認められた。

引用文献

- 荒木 齊・中岡利朗. 1982. クリの更新せん定の強さが樹の生育、収量及び平均果重などに及ぼす影響. 園学雑. 51: 278-285.
- 浅田武典. 1988. 開心形リング樹の果実生産性に関する研究 第1報 津軽地域における優良リング園の収量. 弘前大学農学部学術報告. 49: 47-60.
- Denholm, J. V. and D. J. Conner. 1982. Potential photosynthesis in trellis-type orchard canopies. *Aust. J. Plant Physiol.* 9: 629-640.
- Ferree, D. C. 1980. Canopy development and yield efficiency of 'Golden Delicious' apple trees in four orchard management systems. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 105: 376-380.
- Heinicke, D. R. 1969. The micro-climate of fruit trees. II. Foliage and light distribution patterns in apple trees. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.* 83: 1-11.
- Jackson, J. E. 1968. Aspects of light climate within apple orchards. *J. Appl. Ecol.* 7: 207-216.
- Johnson, R. S. and S. A. Weinbaum. 1987. Variation in tree size, yield, cropping efficiency, and alternate bearing among 'Kerman' pistachio trees. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 112: 942-945.
- 倉橋孝夫. 1997. リングのY字形棚整枝における物質生産と栽培法に関する研究. 島根県農業試験場研究報告. 31: 1-59.
- Mika, A., M. J. Grochowska and A. Karaszewska. 1983. Effects of dormant and summer pruning, disbudding, and growth retardants on growth, flower bud formation, and fruiting of young apple trees. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 108: 655-660.

- 盛岡節夫・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.
- 奥野忠一・久米 均・芳賀敏郎・吉澤 正. 1974. 多変量解析法. 日科技連. 東京.
- 小野祐幸. 1985. ウンシュウミカンの光合成および生産構造からみた収量構成要因に関する研究. 京都大学学位論文. p. 1-168.
- 塩崎雄之輔・菊池卓郎. 1988. 樹勢と摘葉作業が開心形リンゴ樹の樹冠内光条件に及ぼす影響. 弘前大学農学部学術報告. 50: 35-45.
- 塩崎雄之輔・荒川 修・菊池卓郎. 1995. マルバカイドウ台リンゴ‘ふじ’ 弘大方式半密植主幹形樹の樹冠内光条件と果実分布. 園学雑. 63: 711-718.
- 鈴木鉄男・岡本 茂・関 徹夫. 1973. 温州ミカンの樹冠内における微気象要因の分布と着生部位の相違が枝葉・果実の発育に及ぼす影響. 園学雑. 42: 201-209.
- 橘 温. 1990. 異なった栽植密度におけるワセウンシュウの果実生産力, 葉面積指数及び樹冠占有面積率と収量との関係. 園学雑. 58: 871-875.
- 外崎武範・長内敬明・石沢 清・斉藤貞昭. 1990. 青森県におけるリンゴM. 26台‘ふじ’の収量と木の大きさ. 青森りんご試報. 26: 135-157.
- 山本隆儀・佐藤吉雄・舟生卓磨・高野隆志. 1995. リンゴ‘ふじ’樹の推定純光合成速度および果実生産性との関係. 山形大学紀要 (農学) 12 (2): 155-166.
- 山本隆儀. 1999. 果樹園光環境解析システム (OLEAS). 山形大学紀要 (農学) 13 (3): 89-116.
- 山本隆儀・宮田裕美・野口マキ・奥山定治. 2004. 樹冠情報の長期予測を目的とした果樹の樹形構築解析システム (CACOAS) の開発. 山形大学紀要 (農学) 14 (3): 59-93.
- 山本隆儀. 2014. 二つのシミュレーションモデルと純光合成速度推定式を用いたリンゴ園の光環境と光合成の動態に関する研究. 山形大学紀要 (農学) 17 (1): 51-84.