

山形大学紀要（農学）第19巻 第2号：77-104. 令和5年2月
Bull. Yamagata Univ., Agr. Sci., 19(2) : 77-104 Feb. 2023

1樹当たり葉量と園道幅員の違いが果樹園の光環境, 葉層の純光合成速度および園地当たり葉層純光合成量に及ぼす影響 —モデル手法を用いた解析—

山本隆儀

山形大学名誉教授

(令和4年7月19日受付・令和4年9月17日受理)

Effects of Foliage Biomass Amount per Tree and Orchard Road Width on Orchard Light
Environment, Leaf Net Photosynthetic Rate and Amount of Net Photosynthate per Orchard Land
Area : Analyses Using Model Methods

Takanori YAMAMOTO

Professor Emeritus, Yamagata University

(Received July 19, 2022 · Accepted September 17, 2022)

Summary

Effects of foliage biomass amounts per tree or orchard road widths (ORWs) on orchard light environment, leaf net photosynthetic rates and amounts of photosynthates per orchard land area were investigated. In each crown model group (CMG), total 375 crown models were designed to possess fifteen grades of leafy block number per 3D grid (NLB). Total 33,750 orchard models were made by combining these crown models with nine grades of orchard road width (ORW). Light environment in their leaf layers and the photosynthesis of these orchard models were analyzed using OLEAS (Yamamoto, 1999). Daily means of leaf PPFD on a clear day (CDMPPFD) in August and that on an overcast day (ODMPPFD) remarkably decreased by increases of the NLB. High and negative correlations were found between both CDMPPFDs and ODMPPFDs and several characteristics of canopy shape. CDMPPFDs, ODMPPFDs, the leaf net photosynthetic rates on a clear day (CDMPNs) and that on an overcast day (ODMPNs) decreased as the ORWs shortened. When leaf area index per orchard was used as a standard, CDMPPFDs, ODMPPFDs, CDMPNs, ODMPNs, amounts of net photosynthate per orchard land area on a clear day (CDMPNOs) and that on an overcast day (ODMPNOs) were compared between the ten CMGs. Clear differences in these values were found between the CMGs. Using these data above-mentioned, values of CDMPNO and NLB were estimated which were correspondent to three plans for fruit production, viz. slight fruits with excellent quality, moderate fruits with good quality and many fruits with ordinary quality.

Key words : crown model, crown shape, orchard model, training system, virtual 3D grid

緒 言

高品質果実の多収かつ安定的生産には、葉量を確保したうえで、果樹園の光環境をできるだけ改善することが求められる。しかし、実際の樹を用いる果樹園の光環境

や光合成の正確な計測は困難である。筆者らは実際の樹を用いる方法とは別の研究手法の開発を目指し、このための基礎的研究を重ねてきた。すなわち、枝部分の空間座標に関するリモート計測法の開発（山本・山口, 1989; 山本・伊藤, 1996）、枝部分の空間座標と3次元仮想グリッド

キーワード：樹冠モデル、樹冠形、果樹園モデル、せん定システム、三次元仮想グリッド

ド（以下、3Dグリッド）の交錯による葉量の3次元配列データの入手方法の開発（山本・山口, 1989; 山本・畠, 1991）、携帯型光合成測定装置による計測データ（葉面PPFDなど）を説明変数に用いた純光合成速度重回帰式の作成（山本ら, 1993; 山本ら, 1995; 山本・佐藤, 2001; Yamamotoら, 2005）、コンピュータによる樹形や樹冠形の構築方法の開発と関連パラメータの収集（山本ら, 2004; 山本ら, 2007; 山本ら, 2009; 山本, 2014）、3次元仮想グリッドの中の葉ブロックの積木構造図（以下、ソリッドモデル図）の作成方法と樹冠形状値の算出方法の考案（山本ら, 1992; 山本, 1998; 山本, 2015）、果樹園光環境解析システム（OLEAS）の開発と関連パラメータの収集（山本ら, 1999; 山本・奥山, 2004; 山本ら, 2009）、整枝せん定における選択枝系列を用いた樹冠設計システム（CDS）の開発（山本, 2020）などである。これらはいずれもコンピュータプログラムを用いたもので、それぞれ独立したモデルであった。上記の各モデルを組み合わせた研究手法のことを、本報では総称してモデル手法という。

さらに、筆者は2015年以降、高品質果実の多収かつ安定的生産を目標に、樹幅4m、樹高3.5mのリンゴふじの樹冠モデルに限定し、上記モデル手法を用いて、光環境や光合成の改善要因を種々検討してきた。すなわち、シミュレーション手法による5種類の仕立て方法と幾つかのせん定方法を組み合わせたときの光環境の比較（山本, 2015）、ソリッドモデルの手法を用いた樹冠外部形態ならびに内部構造が異なる多くの樹冠の間の光環境の比較（山本, 2016）、これらの樹冠に多種多様な部分的変形処理を施したときの光環境の比較（山本, 2017）および光合成の比較（山本, 2018）、開発した樹冠設計システム（CDS）を用いた整枝せん定の選択枝を組み合わせたときの光環境の比較（山本, 2020）や光合成の比較（山本, 2021）および樹幅および樹高の違いが果樹園の光環境に及ぼす影響（山本, 2022）である。その結果、上記いずれの研究においても、果樹園光環境改善に直結した栽培管理上の有益な知見が数多く得られた。

果樹園光環境の正確な比較のためには果樹園の葉量を一定にする必要があるため、上記研究（山本, 2015, 2016, 2017, 2018, 2020, 2021, 2022）では果樹園土地面積当たり葉面積指数（以下、園地LAI）が1.15に相当する1樹当たり葉量に限定して実験を進めてきた。しかし、果樹の物質生産のより一層の解明には、果樹園の葉量が広

範囲に及ぶ場合についても新たに検討する必要がある。また、上述の全ての実験で、各樹冠モデル群とも、それぞれ特有な1種類の園道幅員を用いたが、園道幅員の違いによる影響についても新たに検討する必要がある。

さらに、これらの研究データから園地の物質生産の潜在力とも言うべき園地当たり葉層純光合成量を算出し、比較する必要がある。ここで葉層純光合成量と表現した理由は、筆者が用いるモデル手法では果実と緑色枝部分の光合成量を除外しているからである。

なお、果樹園の光環境や光合成は樹齢、季節、日天候、樹冠内位置あるいは時刻によって大きく変動する（山本, 2014）。そこで筆者は上述の研究では、真夏の典型的な晴天日と曇天日における成木樹冠を対象に、着生した全ての葉における葉面受光強度と純光合成速度を算出した。さらに、これらデータの毎時分布を用いて日平均値（13時刻平均値）を集計し、果樹園の光環境や光合成を比較する際の指標に用いたものである。

高品質果実の多収かつ安定的生産は生産目標であるが、果樹農家の間には、秀品質果実の少量生産、良品質果実の中量生産あるいは並品質果実の多量生産のような生産目標の多様化が生まれやすい。ただし、ここで言う“秀良並”の区分は糖度、果実の大きさ、着色などに限定した商品性区分である。調理を必要としない果実はたんぱく質、脂肪、糖およびデンプンの貴重な供給源とは言えないものの、ビタミン、ミネラル、有機酸、ペクチン、食物繊維、カロチノイドやポリフェノールなどの抗酸化物質の供給源の一つである。世界人口が増え続ける中、果実生産量は確保されなければならない。また、一人当たり果実消費量に国内外とも大きな格差がみられることから、並品質果実の多量生産の目標は軽視できない。

本研究の柱は以下の4つである。①1樹当たり葉量と園道幅員が果樹園の光環境と葉層の純光合成速度に及ぼす影響、②1樹当たり葉量と園道幅員の違いが園地当たりの葉層純光合成量に及ぼす影響、③広範囲の園地LAIに対する上記①と②の数値の樹冠モデル群間比較、④上記①、②および③の実験結果をふまえた果樹園設計と果樹栽培に関連する技術的情報の入手。

材料および方法

1. 1樹当たり葉量（15段階）と園道幅員（9段階）の組み合わせ

前報（山本, 2022）に記した10種類の樹冠モデル群を

用いた。これらの樹冠モデル群については本報でも頻繁に引用するのでこれらの名称と略語を記す。すなわち、太形（ふとがた）中樹高樹冠モデル群（CMG1）、太形低樹高樹冠モデル群（CMG2）、細形（ほそがた）中樹高樹冠モデル群（CMG3）、細形低樹高樹冠モデル群（CMG4）、超細形中樹高樹冠モデル群（CMG5）、超細形低樹高樹冠モデル群（CMG6）、薄形（うすがた）中樹高樹冠モデル群（CMG7）、薄形低樹高樹冠モデル群（CMG8）、超太形中樹高樹冠モデル群（CMG9）および超太形高樹高樹冠モデル群（CMG10）である。各樹冠モデル群の主枝数実験区（5種類）ごと、葉面受光強度の全葉・全時刻における平均値の大きさの順位（以下、光環境良否の序列）の5位までの整枝せん定選択肢系列（山本, 2021）を組み合わせ、さらに1樹当たり葉量が15段階になるように、合計3,750個（ $=10 \times 5 \times 5 \times 15$ 個）の樹冠モデルを樹冠設計システム（CDS）を用いて設計した。

OLEASによる果樹園の光環境や光合成の解析には3Dグリッドを用いる。このため、1樹当たり葉量の指標として、総葉数や総葉面積を用いる代わりに、3Dグリッド中の葉が含まれるブロック数（以下、葉ブロック数あるいはNLB）を用いた。CDSのプログラム入り口にNLBのループを新設したうえで、整枝せん定の選択肢系列を変えないまま15段階のNLBを実現するための計算プログラムを追加した。この追加部分では、垂主枝以降の枝葉群ユニット（以下、ユニット）の1樹当りの数（以下、NU）によりNLBを調整した。ただし、CDSプログラムではNUをあらかじめ指定できない。つまり、整枝せん定の選択肢系列とNLBが与えられるとき、CDSプログラムの内部計算処理によりNUの実数値が算出される。ただし、NUは最終的に整数値に変えられるため、このときの数値のずれが生ずる。さらに、ユニットが近

接すればNLB数の目減りが発生する。そこで、葉ブロックの積木構造図を作成する直前で、NLBの目標値になるように、乱数を用いて葉ブロック数を増減した（以下、葉ブロック数微調節処理）。

15段階のNLBは以下のように設定した（第1表）。各樹冠モデル群における園地LAI=1.15のときのNLB（山本, 2022）を100%として、その5%刻みで、下方向に7段階および上方向に7段階の合計15段階とした。ただし、1樹当たり葉ブロック数も整数にする必要から、小数点以下を四捨五入した。したがって、15段階と言っても階級幅は完全な均等でなかったことを断っておく（第1表）。なお、リンゴの‘ふじ’を題材とすると、ブロック1辺長の大きいCMG9とCMG10では1葉ブロック中に51枚の葉を含むが、これ以外の樹冠モデル群では15枚の葉を含む。

次に上述の樹冠モデルそれぞれを南北列並木植えにしたうえで、9段階の園道幅員（以下、ORW、第2表）を組み合わせた。この組み合わせで生まれる果樹園を果樹園モデルとよぶ（第1図）。よって、本実験で扱う果樹園モデル数は合計33,750個（ $=3,750 \times 9$ 個）になった。なお、第1図中の1個の矩形は1個の果樹園モデルを示す。また、同図中の大きい矩形内には樹の配植状態を模式的に示した（第1図）。OLEASの計算プログラムでは、必須パラメータとして、樹間距離と樹列間距離を用いる。本実験は南北列並木植えのため、樹間距離は南北樹幅制限値に等しく、樹列間距離は東西樹幅制限値と幅員の合計値である。ただし、上記いずれの距離もブロック1辺長の刻みで設定するため、ORW（ $=$ 樹列間距離 $-$ 東西樹幅制限値）についてもブロック1辺長の刻みで設定しなければならない。前報（山本, 2022）に記した園地LAI=1.15に相当するときのORWを100%とし、20%刻みで、その下方向に4段階および上方向に4段階の合計9段階のORWを設定した（第2表）。ブロック1辺長の刻みで設定する必要から、

Table 1. Leafy block numbers per 3D grid (NLBs) in the fifteen grades.

CMGs	Grades of NLB														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
CMG1, CMG2	426	459	492	523	558	590	623	656	689	721	754	787	820	853	886
CMG3, CMG4	114	123	132	141	150	158	167	176	185	194	202	211	220	229	238
CMG5, CMG6	32	35	37	39	42	44	47	49	51	54	56	59	61	64	66
CMG7, CMG8	160	172	185	197	209	221	234	246	258	271	283	295	308	320	332
CMG9, CMG10	247	266	285	304	323	342	361	380	399	418	437	456	475	494	513

Table 2. Upper: Orchard road width (ORW, unit: cm) in the nine grades, limit south-north width (SNW, unit: cm) and limit east-west width (EWW, unit: cm) in each CMG. Lower: Their planting density (unit: $(10a)^{-1}$).

CMG	Grades of ORW									SNW	EWW
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
CMG1, CMG2	57.1	95.2	133.3	171.4	209.5	247.6	285.7	323.8	361.9	400	400
	55	50	47	44	41	39	36	35	33		
CMG3, CMG4	38.1	76.2	114.3	152.4	190.5	228.6	266.7	304.8	342.9	190	190
	231	198	173	154	138	126	115	106	99		
CMG5, CMG6	19.0	38.1	57.1	76.2	95.2	114.3	133.3	152.4	171.4	100	100
	840	724	636	568	512	467	429	396	368		
CMG7, CMG8	57.1	76.2	95.2	114.3	133.3	152.4	171.4	190.5	209.5	400	130
	134	121	111	102	95	89	83	78	74		
CMG9, CMG10	85.7	114.3	142.9	171.4	200.0	228.6	257.1	285.7	314.3	600	600
	24	23	22	22	21	20	19	19	18		

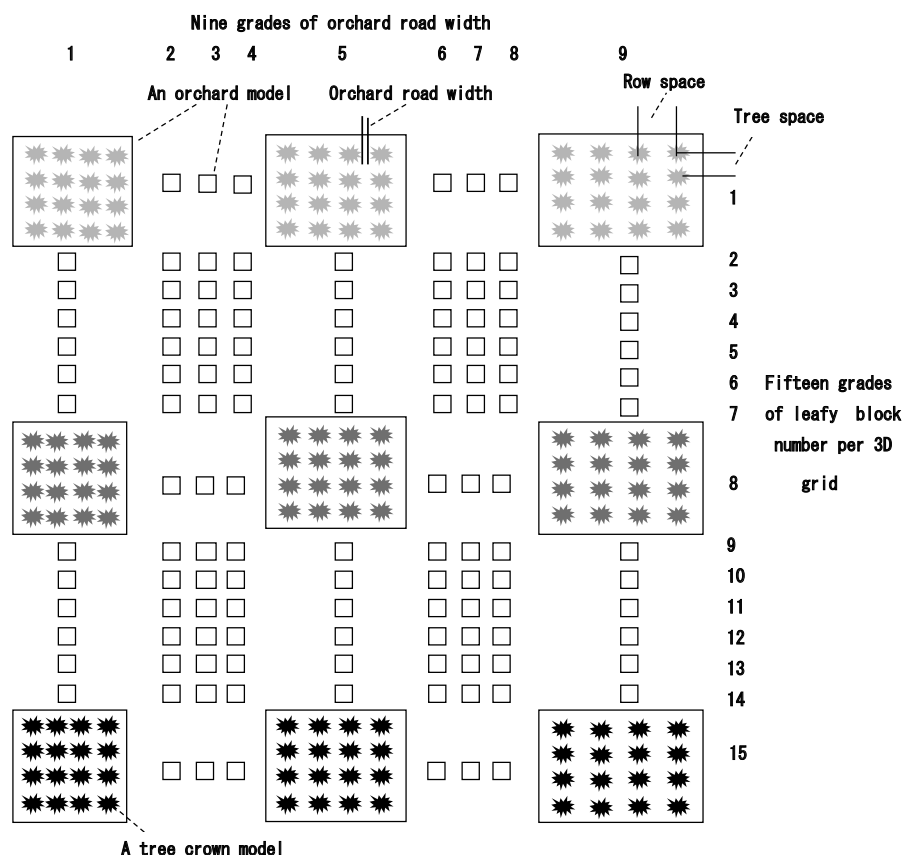


Fig. 1. A schematic illustration of combinations of the fifteen grades of leafy block number per 3D grid with the nine grades of orchard road width. A rectangle indicates an orchard model. In a large rectangle, an arrangement of tree crown models in south-north planting is shown schematically. In each crown model group, these combinations are repeated of each number of PSBs and at five different series of alternatives in pruning procedures.

9段階といっても階級幅は完全な均等でないことを断っておく。なお参考データとして、同表には10a当たり栽植本数も示した。

2. 果樹園の光環境データ、葉層の純光合成速度、園地当たり葉層純光合成量、園地LAIおよび樹冠形状値の算出方法

各樹冠モデルの葉ブロック配列変数(3次元配列変数)を作成したうえで、OLEASのプログラム入口に新設したORWループのもとで、上記葉ブロック配列変数を読み込み、ORWの違いで生じる光環境と葉層の純光合成速度の計算処理を行った。なお、OLEASは各時刻における天空各区画(合計48区画)からの投射光および太陽光を3Dグリッドと交錯させる。この交錯で生まれる斜方柱状光路内の累積葉面積や品種に特有な葉の傾斜角度分布(ベータ分布)を用いて直達光割合の減衰と散乱光強度の減衰の両者を計算する。これとともに、ベータ分

布を用いて個々の葉面に投射する光合成有効光量子束密度(以下、葉面PPFD)を算出する(山本, 1999)。夏季(8月)の日中各時刻(13時刻)における1樹全葉の葉面PPFDを計算し、このデータを用いて13時刻平均値としての日平均値(以下、DMPPFD)を算出した。さらに、各時刻各葉の葉面PPFDを用いて既報(山本, 2018)と同様な方法により、日中各時刻における1樹全葉の純光合成速度を計算し、このデータを用いて13時刻平均値としての日平均値(以下、DMPN)を算出した。晴天日および曇天日のDMPPFDにはそれぞれCDMPPFDおよびODMPPFDの略号を用いた(単位は $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)。また、晴天日および曇天日のDMPNにはそれぞれCDMPNおよびODMPNの略号を用いた(単位は $\text{mgCO}_2 \cdot \text{dm}^2 \cdot \text{h}^{-1}$)。

なお、上記計算に用いた天空光の水平面PPFDおよび太陽光の水平面PPFDは、鶴岡市における8月中下旬の典型的な晴天日および曇天日の朝6時から18時までの各

時刻に計測したデータを用いたが、詳しくは既報（山本、1999）を参照されたい。

次に、上述のDMPN、樹間距離（m）、樹列間距離（m）および1樹の総葉面積（ cm^2 ）を用いて、夏季（8月）の1日における園地面積10aに存在する葉の純光合成量（以下、DMPNO）を（1）式を用いて算出した。単位は $\text{kgCO}_2 \cdot (10\text{a})^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ である。

$$\text{DMPNO} = 13 \times \text{DMPN} / 10 \times \text{葉ブロック当たり葉数} \times \text{個葉面積} \times 1 \text{樹当り葉ブロック数} / (\text{樹間距離} \times \text{樹列間距離}) \quad (1)$$

なお、晴天日および曇天日のDMPNOにはそれぞれCDMPNOおよびODMPNOの略号を用いた。

樹冠モデル群によって樹幅制限値が大きく異なるため（山本、2022）、15段階のNLBの範囲も樹冠モデル群によって異なった（第1表）。よって、DMPNOの大小を樹冠モデル群間で比較検討するには、園地面積当たり葉面積指数（以下、園地LAIあるいはLAIo）を共通の基準にする必要がある。園地LAIは（2）式を用いて算出できる。

$$\text{園地LAI} = \text{NLB} \times 1 \text{葉ブロックに含まれる葉数} \times \text{個葉面積} / (\text{樹間距離} \times \text{樹列間距離}) \quad (2)$$

上述の計算を全ての樹冠モデル群および主枝数実験区で繰り返した。さらに各樹冠モデルの樹冠形状値も算出した。樹冠形状値の算出方法は既報（山本、2015）に準じたが、本報では光環境の良否に密接な以下の5個の樹冠形状値に限定した。すなわち、樹冠占有面積（以下、LAO、単位は m^2 ）、全ての葉ブロック数に占める閉鎖空間内の葉ブロック数の割合（以下、PNLES、単位は%）、3次元グリッドの南北方向各ブロック列中の連続する葉ブロック数の平均値（以下、MCFNS）、3次元グリッドの垂直方向各ブロック列中の連続する葉ブロック数の平均値（以下、MCFVD）および全葉ブロック数に占める樹冠表面の葉ブロック数の割合（以下、PSLB、単位は%）を算出した。なお、いずれの樹冠形状値も樹冠モデルにつき1個の値を有する。

結 果

実験結果の量は膨大になったため、結果についてはできるだけ表を用い、グラフは各樹冠モデル群とも1種類の主枝数実験区に限定した。また、CMG1に限り晴天日と曇天日のデータを示し、これ以外については晴天日のみを示した。

1. 広範囲の1樹当たり葉ブロック数（NLB）を組み合わせたときの樹冠モデルの設計結果

樹形図、樹冠形図およびソリッドモデル図（葉ブロックの積木構造図）の画像を示し、広範囲のNLBを組み合わせたときのCDSの性能を検討した（第2図、第3図および第4図）。これらの画像については、CMG1、CMG3、CMG5、CMG7およびCMG9に限定し、さらに1種類の主枝数実験区と1個の整枝せん定選択枝系列の場合に限定した。そして、NLBの段階については段階1、8および15に限定した（第2図、第3図および第4図）。なお、第4図のソリッドモデルのうち、CMG1、CMG7およびCMG9については1樹分、CMG3については樹列中の2樹分、およびCMG5については樹列中の4樹分を示した。整枝せん定の選択枝系列が同じであることから、樹形の特徴は互いに良く似たが、NLBの増大に伴い葉量とNUが増大した。

葉ブロック数微調節処理前における設定NLBとNUの間には比例関係が認められた（第5図）。樹冠モデル群に

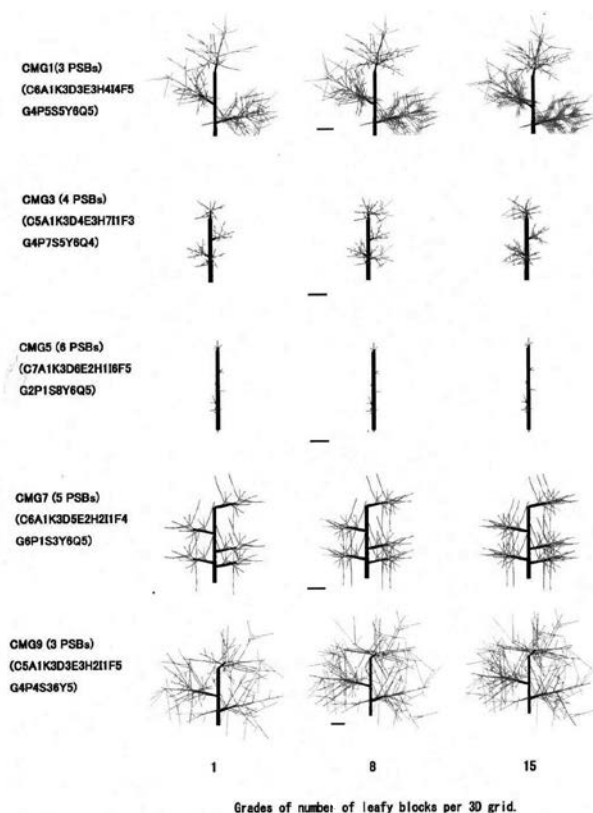


Fig. 2. Examples of tree shapes (views from the east) in several crown model groups at 1, 8 and 15 grade of leafy block number per 3D grid in each crown model group. PSB indicates primary scaffold branch. Series of alternatives of pruning procedure are indicated in the parentheses. A horizontal line indicates 50 cm.

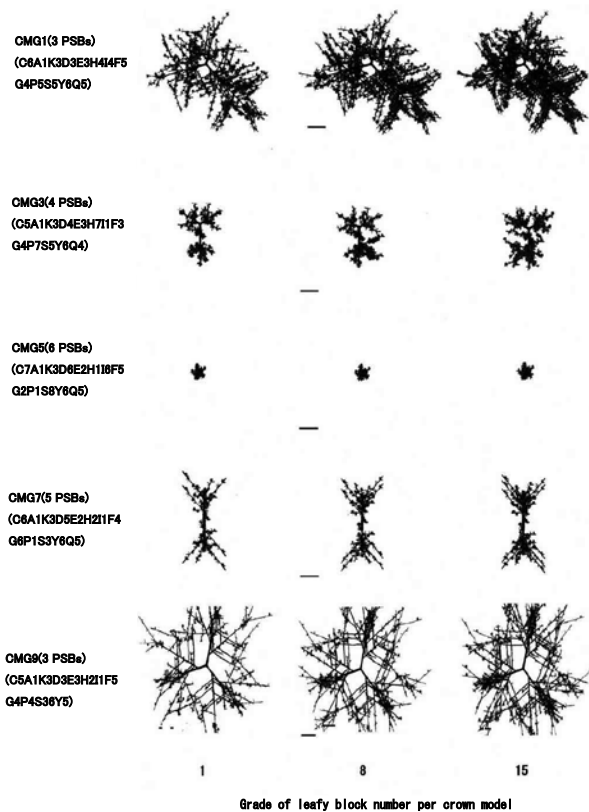


Fig. 3. Examples of crown shapes (views from the top) in several crown model groups at 1, 8 and 15 grade of leafy block number per 3D grid in each crown model group. The explanations in the figure refer to Fig 2.

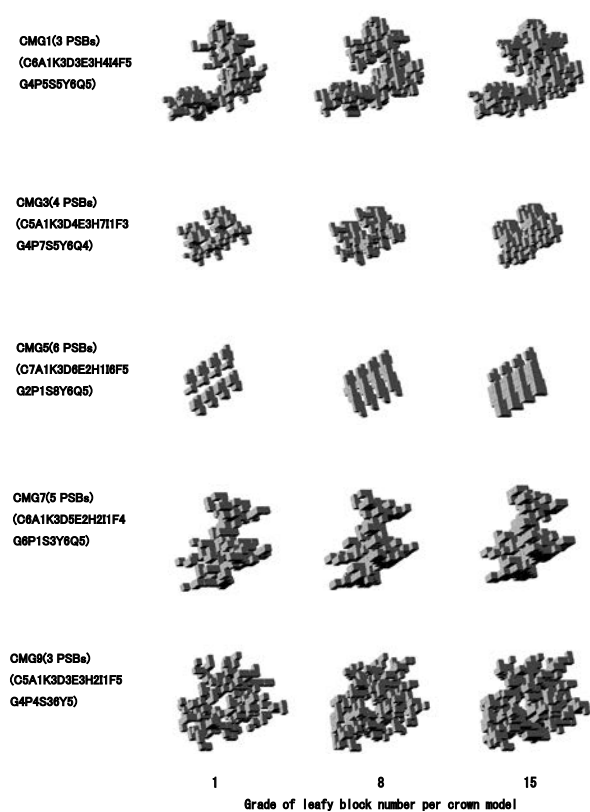


Fig. 4. Examples of solid models at 1, 8 and 15 grades of leafy block number per 3D grid in each crown model group. The solid model in CMG3 was made of two trees and that in CMG5 was made of four trees. The explanations in the figure refer to Fig 2.

よってユニットのサイズが異なったので、設定NLBに対するNUの勾配も異なった（第5図）。ただし、同じ樹幅であれば樹高が異なってもユニットのサイズは同じであるため、例えば、CMG1とCMG2のように、グラフ上でシンボルはほぼ重なった（第5図）。

葉ブロック数微調節処理前におけるNLBの設定数（以下、設定NLB）に対する実現数（以下、実現NLB）は樹幅の小さいCMG3, CMG4, CMG5およびCMG6では全体的に1対1線より小さく、CMG1, CMG2, CMG7およびCMG8では設定数が大きいところでも1対1線より小さかった（第6図）。一方、CMG9とCMG10では全体的に1対1線より大きかった（第6図）。ただし、乱数を用いて追加あるいは削除を行う葉ブロック数微調節処理により、全樹冠モデル群および全ての主枝数実験区とも設定数に調節できた。

2. 1樹当たり葉量の違いが果樹園の光環境と葉層の純光合成速度に及ぼす影響

NLBの違いがCDMPFFD, ODMPPFD, CDMPNおよびODMPNに及ぼす影響の1例として、CMG1の3本主枝数実験区の結果を第7図および第8図に示した。ORWの違いによる影響も重なることで、両図の散布図のデータには分散が認められた。しかし、NLBの増大に伴いCDMPFFD, ODMPPFD, CDMPNおよびODMPNは顕著に減少し、単相関係数はそれぞれ -0.989 , -0.952 , -0.988 および -0.951 であった。

CMG1以外のグラフについてはCDMPFFDに限定して示す（第9図）。CMG1の実験結果とほぼ似て、NLBの増大に伴い果樹園の光環境が悪化する傾向が顕著にみられた。ただし、CMG3, CMG4, CMG5およびCMG6ではデータの分散が増大した。

次に、各樹冠モデル群全ての主枝数実験区におけるNLBと光環境および光合成の相関係数を第3表に示した。いずれも有意な負の相関が認められたが、CMG5とCMG6では曇天日の相関が低下した（第3表）。

既報（山本, 2021, 2022）の実験で、複数の樹冠形状値

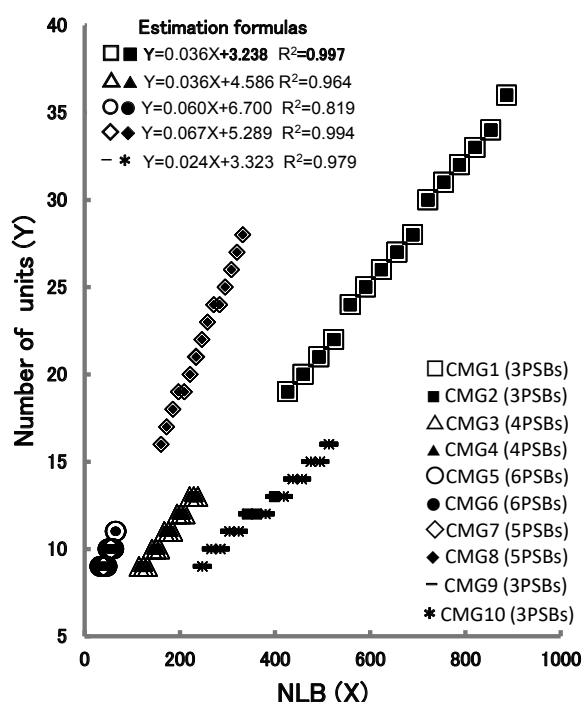


Fig. 5. Relations between leafy block numbers per 3D grid (NLBs) and numbers of units (units of stems after secondary scaffold branches) in each CMG. PSBs indicate primary scaffold branches.

と光環境データとの間に密接な関係が認められ、特に CDMPPFD や ODMPPFD と PNLES, MCFNS および MCFVD の間に負の相関、LAO や PSLB の間に正の相関が認められた。ただし、上記の結果はいずれも NLB を等しくしたときのものであった。そこで本実験のように NLB が広い範囲に及ぶ場合の NLB, CDMPPFD および ODMPPFD の3者と樹冠形状値の間の相関関係を調査した (第4表)。その結果、多くの樹冠モデル群および主枝数実験区とも、NLB と LAO, PNLES, MCFNS および MCFVD との間に高い正の相関関係が認められた (第4表)。一方、PSLB との間の相関のほとんどが有意でなかった。さらに、多くの全樹冠モデル群における全ての ORW で CDMPPFD あるいは ODMPPFD と LAO, PNLES, MCFNS および MCFVD の間には高い負の相関関係、PSLB の間には低い正の相関関係が認められた (第4表)。ただし、CMG5, CMG6, CMG3, CMG4 では相関は全体的に低く、かつ有意でないものもみられた。

以上の結果、NLB の増大による CDMPPFD などの減少には樹冠形状値が深く関与することが明らかとなった。

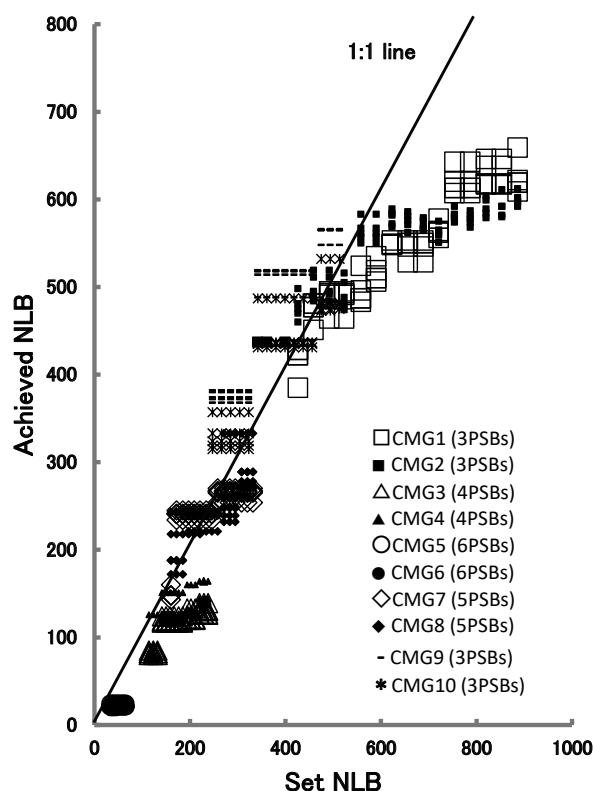


Fig. 6. Relations between set leafy block numbers per 3D grid (set NLB) and achieved ones before the adjustment (achieved NLB) in each CMG. PSB indicates the primary scaffold branch.

3. 園道幅員 (ORW) の違いが果樹園の光環境と葉層の純光合成速度に及ぼす影響

果樹園の光環境などに及ぼす ORW の影響を明らかにするため、CMG1 に限り、横軸に ORW を取り、縦軸に CDMPPFD, ODMPPFD, CDMPN および ODMPN の各データ値を NLB 別にシンボルを変えたときの散布図を作成した (第10図および第11図)。その結果、分散を伴うものの、多くの NLB 区で ORW が減少するほど CDMPPFD, ODMPPFD, CDMPN および ODMPN も減少する傾向がみられた。しかし、このときの減少程度は大きくなかったうえに、NLB が大きくなるとこれらデータの分散が増大する傾向が現れた。

CMG1 以外の樹冠モデル群の散布図 (この場合は CDMPPFD のみ) のうち、CMG2, CMG9 および CMG10 では上記同様な傾向がみられたものの (第12図)、これ以外の樹冠モデル群には明瞭な傾向はみられなかった。特に、CMG3, CMG4, CMG7, CMG8 では NLB が大きいところで分散が大きくなった。

第10図および第12図には ORW の影響と NLB の影響が重複して現れる。そこで、CDMPPFD などに対する

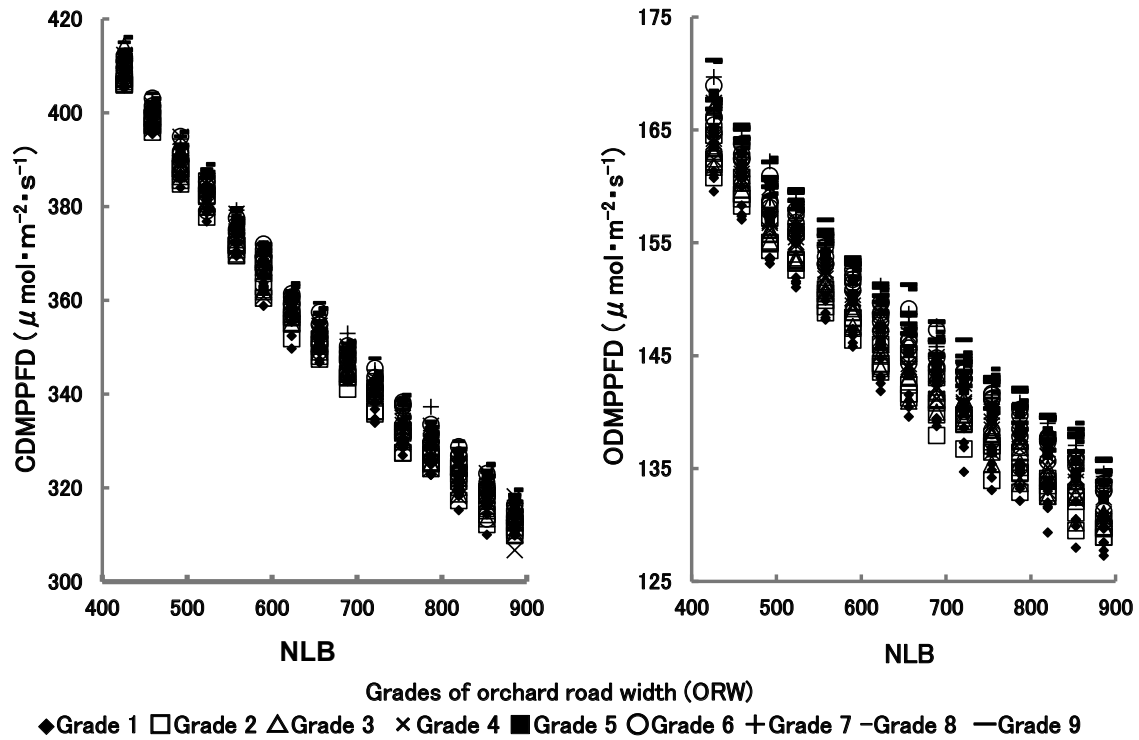


Fig. 7. Relations between leafy block numbers per 3D grid (NLBs) and CDMPPFDs (left) or ODMPPFDs (right) in CMG1 (3 PSBs). The orchard road widths (ORWs) refer to Table 2.

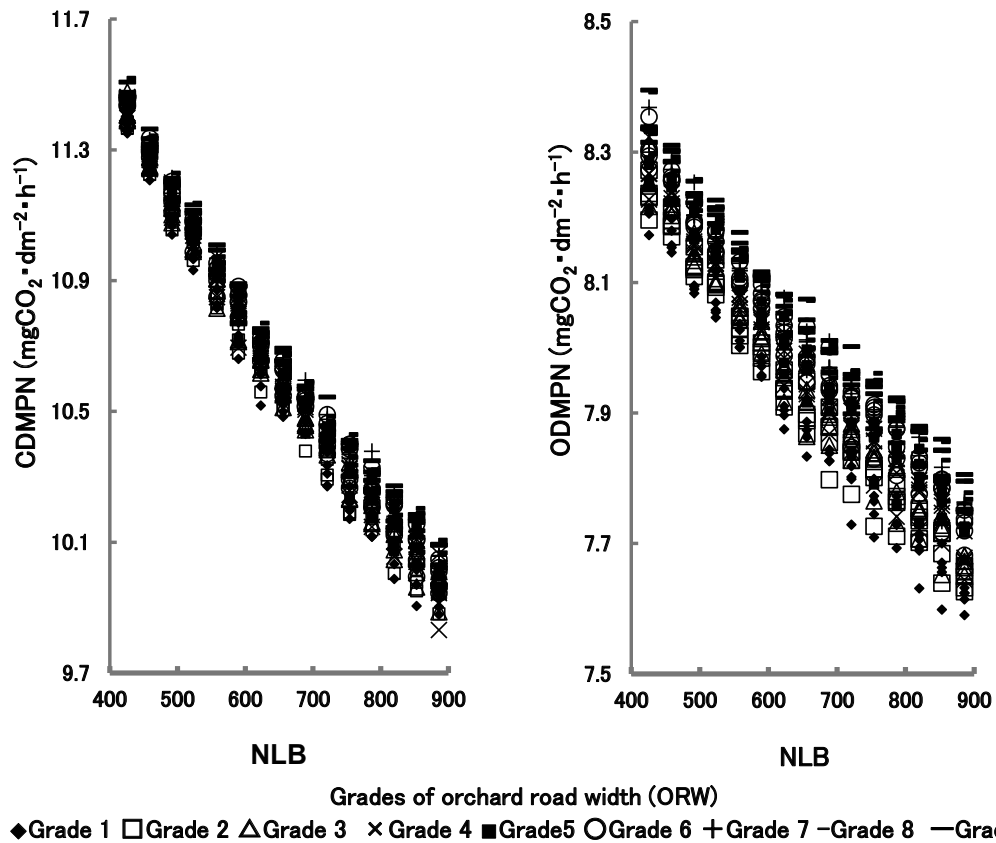


Fig. 8. Relations between leafy block numbers per 3D grid (NLBs) and CDMPNs (left) or ODMPNs (right) in CMG1 (3 PSBs). The orchard road widths (ORWs) refer to Table 2.

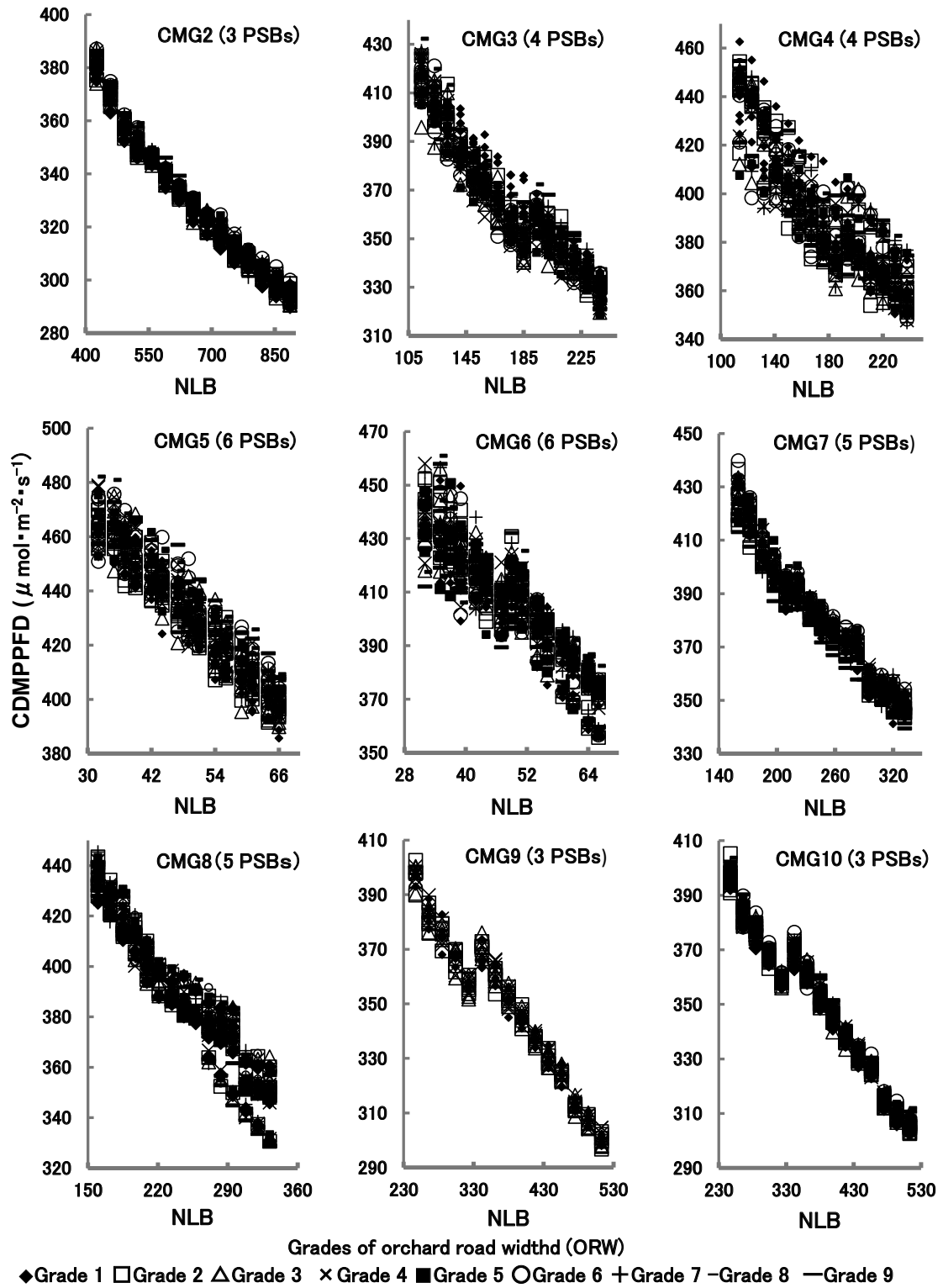


Fig. 9. Relations between NLBs and CDMPPFDs in each CMG. The explanations of the figures refer to Fig. 7.

Table 3. Coefficients of correlations between leafy block numbers per 3D grid and CDMPPFDs, ODMPPFDs, CDMPNs and ODMPNs in each CMG. The all coefficients of correlation are significant at 0.1 % level (n=675).

CMG	Num. of PSBs	CDM-PPFD	ODM-PPFD	CDM-PN	ODM-PN	CMG	Num. of PSBs	CDM-PPFD	ODM-PPFD	CDM-PN	ODM-PN
CMG1	2	-0.981	-0.968	-0.982	-0.962	CMG6	2	-0.958	-0.694	-0.957	-0.451
	3	-0.989	-0.962	-0.988	-0.951		3	-0.864	-0.756	-0.882	-0.245
	4	-0.984	-0.969	-0.986	-0.966		4	-0.899	-0.586	-0.914	-0.325
	5	-0.989	-0.978	-0.988	-0.967		5	-0.924	-0.810	-0.949	-0.521
	6	-0.971	-0.957	-0.973	-0.957		6	-0.914	-0.841	-0.935	-0.576
CMG2	2	-0.987	-0.985	-0.989	-0.985	CMG7	2	-0.956	-0.910	-0.954	-0.833
	3	-0.984	-0.976	-0.986	-0.977		3	-0.864	-0.886	-0.877	-0.773
	4	-0.982	-0.976	-0.983	-0.975		4	-0.960	-0.920	-0.971	-0.812
	5	-0.975	-0.972	-0.979	-0.977		5	-0.975	-0.921	-0.977	-0.819
	6	-0.979	-0.977	-0.983	-0.980		6	-0.964	-0.949	-0.970	-0.874
CMG3	2	-0.960	-0.937	-0.969	-0.837	CMG8	2	-0.957	-0.948	-0.959	-0.930
	3	-0.975	-0.937	-0.973	-0.815		3	-0.963	-0.971	-0.969	-0.951
	4	-0.947	-0.965	-0.963	-0.955		4	-0.961	-0.943	-0.964	-0.906
	5	-0.912	-0.946	-0.931	-0.918		5	-0.962	-0.962	-0.968	-0.913
	6	-0.966	-0.953	-0.970	-0.937		6	-0.917	-0.932	-0.931	-0.881
CMG4	2	-0.969	-0.949	-0.966	-0.911	CMG9	2	-0.980	-0.980	-0.983	-0.957
	3	-0.967	-0.971	-0.972	-0.964		3	-0.979	-0.969	-0.982	-0.926
	4	-0.899	-0.936	-0.908	-0.921		4	-0.955	-0.960	-0.962	-0.906
	5	-0.929	-0.956	-0.942	-0.929		5	-0.988	-0.988	-0.991	-0.965
	6	-0.930	-0.968	-0.943	-0.960		6	-0.957	-0.974	-0.966	-0.956
CMG5	2	-0.825	-0.660	-0.842	-0.567	CMG10	2	-0.975	-0.961	-0.978	-0.930
	3	-0.965	-0.780	-0.961	-0.651		3	-0.982	-0.967	-0.984	-0.931
	4	-0.948	-0.606	-0.937	-0.423		4	-0.975	-0.834	-0.966	-0.701
	5	-0.856	-0.654	-0.844	-0.331		5	-0.987	-0.978	-0.989	-0.967
	6	-0.949	-0.743	-0.953	-0.471		6	-0.991	-0.945	-0.993	-0.891

ORW単独の影響を明らかにするため、ORWを主標、NLBを副標として、偏相関分析を行った（第5表）。その結果、CMG1、CMG2、CMG5、CMG9およびCMG10のほとんどの主枝数実験区で有意な正の偏相関係数が認められた。しかし、CMG3、CMG4、CMG6、CMG7およびCMG8の多くの主枝数実験区で有意な正の偏相関がみられなかった。また、多くの場合、上記偏相関は晴天日より曇天日の方が高かった。

4. 1樹当たり葉ブロック数と園道幅員の違いが園地当たり葉層純光合成量（DMPNO）に及ぼす影響

結果の2に記したように、NLBの増大により果樹園の光環境データ（CDMPPFDとODMPPFD）や葉層の純光合成速度（CDMPNとODMPN）が著しく減少した。また、結果の3に記したように、ORWの減少によりCDMPPFD、ODMPPFD、CDMPNおよびODMPNの減少がみられた。しかしながら、CDMPPFDとODMPPFDは葉面の日平均受光強度にすぎず、また、CDMPNとODMPNは葉層の日平均純光合成速度にすぎない。上記データだけで園地の物質生産性を十分に表わすことはで

きない。何故ならば、一定土地面積の園地に存在する葉の量はNLBとORWで決まるからである。そこで、(1)式を用いて園地当たり葉層純光合成量（CDMPNOとODMPNO）を算出し、これらとNLBあるいはORWの数量的関係を明らかにする必要がある。

CMG1における数量的関係（第13図）から次の2つの特徴がみられた。すなわち、CDMPNOとODMPNOはNLBの増大によりほぼ直線的に増大して、ORWの増大により減少することである。園地の物質生産からみれば、ORWの影響も大きいものと言える。第13図には、結果の2および3でみられた樹冠モデルの形状の違いによるCDMPPFD、ODMPPFD、CDMPNおよびODMPNの分散が現れたものの、縦軸をCDMPNOやODMPNOに取ることによって、上記分散はグラフ上ではほとんどなかった。

上記の傾向はCMG1における他の主枝数実験区にもみられた（データ略）。また、他の樹冠モデル群にも同様な傾向が認められたが（データ略）、第14図はCDMPNOとの関係を示したものである。これらのグラフ両軸の変域は樹冠モデル群によって異なったものの、第13図と似た傾向がみられた。なお、第14図の主枝数実験区は1種

Table 4. Coefficients of correlation (rs) between leafy block numbers per 3D grids (NLBs) and several characteristics of canopy shapes (left, n=75), that between CDMPPFDs and several characteristics of canopy shapes (middle, n=675) and that between ODMPPFDs and several characteristics of canopy shapes (right, n=675).

CMG	NP-SB	NBL					CDMPFFD in all ORWs					ODMPFFD in all ORWs				
		LAO	MCFNS	MCFVD	PNLES	PSLB	LAO	MCFNS	MCFVD	PNLES	PSLB	LAO	MCFNS	MCFVD	PNLES	PSLB
CMG1	2	0.872	0.930	0.980	0.982	-0.194	-0.886	-0.954	-0.973	-0.988	0.137	-0.886	-0.942	-0.953	-0.972	0.060
	3	0.741	0.828	0.981	0.956	-0.207	-0.765	-0.841	-0.977	-0.969	0.158	-0.716	-0.852	-0.949	-0.944	0.066
	4	0.731	0.828	0.969	0.922	-0.228	-0.692	-0.868	-0.969	-0.947	0.193	-0.701	-0.893	-0.952	-0.961	0.137
	5	0.798	0.888	0.929	0.969	-0.191	-0.793	-0.906	-0.926	-0.984	0.153	-0.775	-0.908	-0.922	-0.976	0.097
	6	0.904	0.882	0.966	0.901	-0.234	-0.936	-0.937	-0.952	-0.943	0.183	-0.933	-0.940	-0.942	-0.933	0.146
CMG2	2	0.323	0.834	0.990	0.974	-0.168	-0.235	-0.802	-0.983	-0.975	0.132	-0.255	-0.793	-0.981	-0.979	0.099
	3	0.781	0.622	0.985	0.917	-0.239	-0.820	-0.695	-0.977	-0.951	0.210	-0.841	-0.714	-0.956	-0.947	0.168
	4	0.920	0.857	0.973	0.943	-0.213	-0.932	-0.891	-0.950	-0.979	0.185	-0.937	-0.904	-0.933	-0.982	0.157
	5	0.898	0.791	0.973	0.845	-0.226	-0.848	-0.862	-0.982	-0.922	0.203	-0.848	-0.853	-0.979	-0.921	0.171
	6	0.848	0.844	0.983	0.890	-0.234	-0.865	-0.905	-0.982	-0.948	0.204	-0.874	-0.897	-0.976	-0.947	0.168
CMG3	2	0.800	0.674	0.980	0.877	-0.144	-0.747	-0.591	-0.974	-0.901	0.112	-0.829	-0.756	-0.907	-0.840	0.100
	3	0.822	0.634	0.754	0.717	-0.098	-0.758	-0.649	-0.813	-0.720	0.132	-0.746	-0.649	-0.763	-0.758	0.102
	4	0.868	0.814	0.718	0.883	-0.112	-0.732	-0.807	-0.826	-0.885	0.099	-0.825	-0.823	-0.723	-0.912	0.092
	5	0.248	0.708	0.643	0.849	-0.118	0.111	-0.833	-0.828	-0.941	0.083	-0.208	-0.757	-0.602	-0.862	0.080
	6	0.874	0.652	0.947	0.889	-0.071	-0.816	-0.657	-0.934	-0.910	0.061	-0.835	-0.667	-0.912	-0.904	0.062
CMG4	2	0.782	0.582	0.953	0.799	-0.214	-0.721	-0.668	-0.963	-0.843	0.174	-0.741	-0.701	-0.938	-0.872	0.098
	3	0.859	0.781	0.922	0.928	-0.135	-0.786	-0.803	-0.943	-0.918	0.114	-0.837	-0.798	-0.915	-0.927	0.195
	4	0.797	0.792	0.660	0.868	-0.214	-0.508	-0.831	-0.861	-0.904	0.195	-0.609	-0.854	-0.792	-0.926	0.201
	5	0.402	0.761	0.608	0.867	-0.147	-0.108	-0.737	-0.782	-0.763	0.118	-0.280	-0.802	-0.714	-0.869	0.142
	6	0.334	0.568	0.830	0.770	-0.162	-0.062	-0.677	-0.931	-0.821	0.121	-0.243	-0.663	-0.866	-0.847	0.117
CMG5	2	0.567	0.407	0.662	0.318	-0.094	-0.093	-0.164	-0.816	-0.399	0.069	-0.526	-0.532	-0.315	-0.250	0.095
	3	0.642	0.098	0.774	0.459	-0.100	-0.660	-0.072	-0.803	-0.381	0.074	-0.514	-0.100	-0.595	-0.322	0.185
	4	0.628	0.263	0.869	0.666	-0.078	-0.496	-0.128	-0.913	-0.555	0.064	-0.332	-0.107	-0.546	-0.450	0.121
	5	0.708	0.431	0.518	0.703	-0.051	-0.492	-0.432	-0.805	-0.601	0.074	-0.512	-0.422	-0.362	-0.628	0.136
	6	0.677	0.227	0.714	0.790	-0.062	-0.640	-0.215	-0.802	-0.736	0.087	-0.429	-0.319	-0.512	-0.752	0.115
CMG6	2	0.852	0.375	0.839	0.647	-0.147	-0.749	-0.357	-0.904	-0.577	0.117	-0.565	-0.258	-0.580	-0.574	0.093
	3	0.594	0.616	0.611	0.786	-0.210	-0.240	-0.462	-0.880	-0.712	0.162	-0.740	-0.787	-0.418	-0.583	0.165
	4	0.585	0.549	0.739	0.601	-0.112	-0.577	-0.664	-0.802	-0.526	0.112	-0.406	-0.468	-0.263	-0.571	0.101
	5	0.781	0.635	0.750	0.719	-0.170	-0.638	-0.551	-0.876	-0.766	0.134	-0.623	-0.578	-0.433	-0.643	0.125
	6	0.759	0.539	0.714	0.747	-0.089	-0.576	-0.405	-0.842	-0.739	0.174	-0.644	-0.696	-0.621	-0.752	0.110
CMG7	2	0.899	0.761	0.913	0.790	-0.187	-0.902	-0.885	-0.950	-0.845	0.145	-0.861	-0.887	-0.929	-0.870	0.156
	3	0.415	0.674	0.829	0.860	-0.214	-0.072	-0.706	-0.910	-0.923	0.184	-0.287	-0.659	-0.764	-0.881	0.142
	4	0.550	0.695	0.856	0.862	-0.145	-0.416	-0.801	-0.930	-0.807	0.167	-0.688	-0.589	-0.754	-0.918	0.090
	5	0.964	0.942	0.937	0.923	-0.214	-0.935	-0.945	-0.953	-0.926	0.214	-0.908	-0.914	-0.929	-0.936	0.183
	6	0.912	0.902	0.932	0.944	-0.157	-0.859	-0.942	-0.949	-0.934	0.201	-0.881	-0.939	-0.900	-0.950	0.172
CMG8	2	0.902	0.718	0.930	0.909	-0.116	-0.914	-0.845	-0.973	-0.948	0.122	-0.935	-0.862	-0.959	-0.947	0.133
	3	0.954	0.913	0.938	0.924	-0.116	-0.902	-0.923	-0.951	-0.917	0.145	-0.931	-0.932	-0.936	-0.924	0.114
	4	0.954	0.861	0.694	0.854	-0.107	-0.934	-0.883	-0.637	-0.862	0.214	-0.963	-0.928	-0.711	-0.934	0.091
	5	0.794	0.767	0.770	0.922	-0.198	-0.682	-0.794	-0.836	-0.886	0.117	-0.702	-0.866	-0.779	-0.946	0.095
	6	0.457	0.761	0.526	0.870	-0.103	-0.221	-0.763	-0.725	-0.920	0.200	-0.532	-0.883	-0.475	-0.928	0.100
CMG9	2	0.952	0.886	0.945	0.978	-0.182	-0.913	-0.926	-0.933	-0.985	0.133	-0.926	-0.909	-0.919	-0.976	0.090
	3	0.951	0.888	0.901	0.935	-0.147	-0.887	-0.935	-0.947	-0.968	0.142	-0.898	-0.899	-0.911	-0.941	0.081
	4	0.870	0.836	0.816	0.940	-0.111	-0.711	-0.914	-0.900	-0.959	0.040	-0.811	-0.883	-0.858	-0.964	0.037
	5	0.761	0.933	0.911	0.972	-0.163	-0.692	-0.936	-0.932	-0.975	0.118	-0.731	-0.947	-0.929	-0.976	0.110
	6	0.868	0.797	0.790	0.933	-0.216	-0.753	-0.879	-0.881	-0.959	0.059	-0.835	-0.859	-0.846	-0.963	0.151
CMG10	2	0.794	0.885	0.753	0.928	-0.186	-0.724	-0.909	-0.811	-0.941	0.151	-0.785	-0.880	-0.714	-0.906	0.057
	3	0.937	0.895	0.826	0.952	-0.158	-0.876	-0.923	-0.896	-0.974	0.137	-0.892	-0.879	-0.827	-0.956	0.081
	4	0.929	0.760	0.740	0.860	-0.195	-0.909	-0.825	-0.791	-0.913	0.154	-0.828	-0.958	-0.920	-0.965	0.100
	5	0.964	0.912	0.923	0.976	-0.198	-0.950	-0.934	-0.933	-0.984	0.218	-0.942	-0.942	-0.919	-0.977	0.153
	6	0.935	0.934	0.916	0.974	-0.189	-0.908	-0.931	-0.931	-0.975	0.166	-0.879	-0.950	-0.938	-0.957	0.125
P<5%, if r >0.238							P<5%, if r >0.091					P<5%, if r >0.091				

類に限定したが、他の主枝数実験区にもこれと似た傾向がみられた（データ略）。

5. 園地LAIを基準にした果樹園の光環境、葉層の純光合成速度および園地当たり葉層純光合成量に関する樹冠モデル群間比較

結果の2および3に記した果樹園の光環境データ（CDMPPFDとODMPPFD）や葉層の純光合成速度（CDMPNとODMPN）あるいは結果の4に記した園地当たりの葉層純光合成量（CDMPNOとODMPNO）は、

樹幅、樹高、NLB、ORWなどの各樹冠モデル群に特有な数値を用いて算出した。したがって、これら数値を樹冠モデル群間で比較検討するには、園地LAIを共通の基準にする必要がある。同じORWでは、(2)式よりNLBと園地LAIの間に比例関係が成立し、また、ORWが異なれば、これらの回帰式の切片と傾きが異なった（第15図）。なお、第15図は各樹冠モデル群とも一種類の主枝数実験区に限定したが、他の主枝数実験区でも同じ傾向がみられた（データ略）。

次に、各樹冠モデル群とも特定の主枝数実験区および

幅員段階が5のときに限り、横軸に園地LAIを取り、縦軸にCDMPFDとODMPFDを取った散布図（第16図）、CDMPNとODMPNを取った散布図（第17図）あるいはCDMPNOとODMPNOを取った散布図（第18図）を作

成した。これらの図から、園地LAIの増大によりCDMPFD、ODMPFD、CDMPNおよびODMPNは減少して、CDMPNOとODMPNOは増大した。また、園地LAIの広い範囲にわたり、多くの樹冠モデル群の間に上記数値の

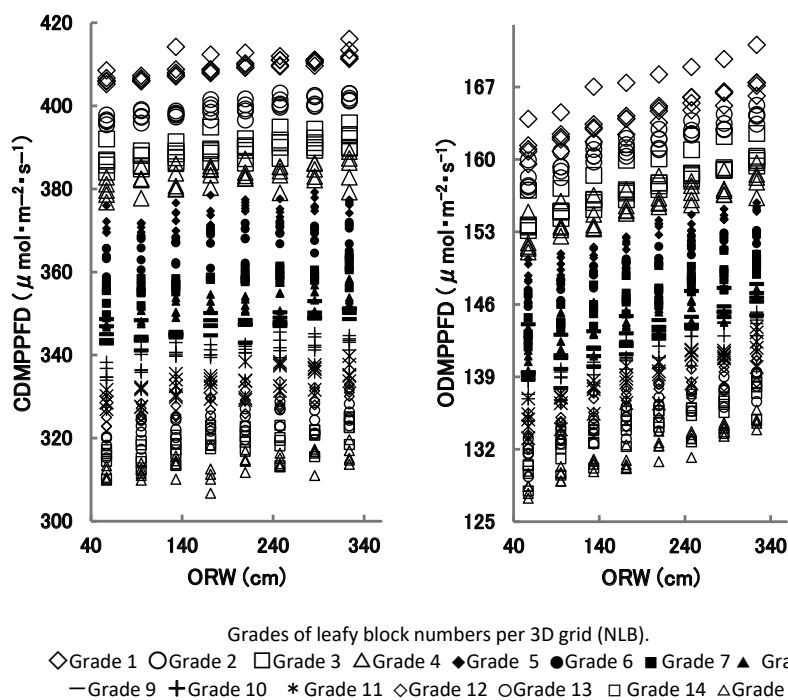


Fig.10. Relations between orchard road widths (ORWs) and CDMPFDs (left) or ODMPPFDs (right) in CMG1 (3 PSBs). NLBs refer to Table 1.

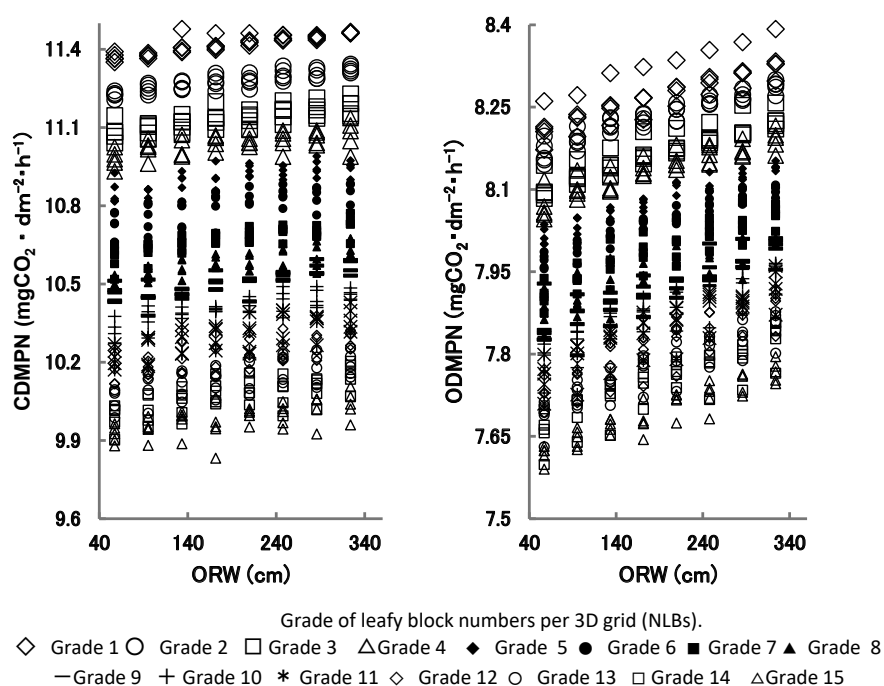


Fig.11. Relations between orchard road widths (ORWs) and CDMPNs (left) or ODMPPNs (right) in CMG1 (3 PSBs). The NLBs refer to Table 1.

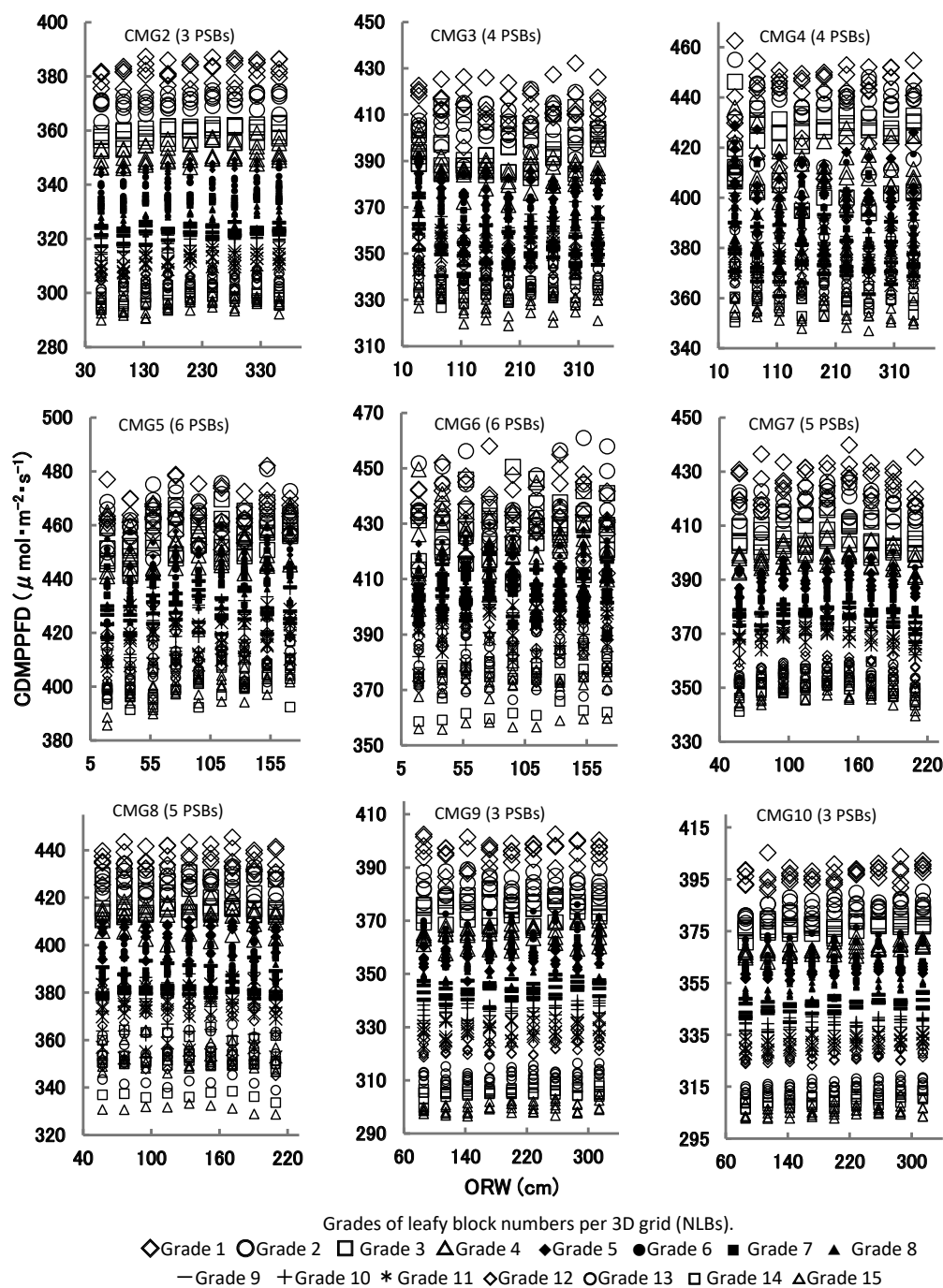


Fig.12. Relations between orchard road widths (ORWs) and CDMPPFDs in other CMGs. The NLBs refer to Table 1.

Table 5. Partial coefficients of correlation (rs) between orchard road widths and CDMPPFDs or ODMPPFDs where the leafy block numbers per 3D grid was used as a sub-indicator. P<5% if |r| >0.091 (n=675).

CMG	2 PSBs		3 PSBs		4 PSBs		5 PSBs		6 PSBs	
	CDMPPFD	ODMPPFD	CDMPPFD	ODMPPFD	CDMPPFD	ODMPPFD	CDMPPFD	ODMPPFD	CDMPPFD	ODMPPFD
CMG1	0.344	0.752	0.472	0.812	0.251	0.549	0.293	0.650	0.216	0.435
CMG2	0.222	0.534	0.226	0.536	0.133	0.353	0.135	0.370	0.171	0.437
CMG3	0.156	0.571	-0.237	-0.271	-0.065	0.069	0.358	-0.122	0.047	0.073
CMG4	0.052	0.180	0.081	0.107	-0.009	0.090	0.068	0.280	0.069	0.136
CMG5	0.261	0.720	0.529	0.870	0.099	0.696	0.229	0.757	0.320	0.535
CMG6	0.131	0.549	-0.007	0.312	0.032	0.249	0.095	0.148	0.069	0.186
CMG7	-0.058	-0.124	-0.009	-0.024	-0.040	-0.114	-0.045	-0.041	-0.015	-0.009
CMG8	-0.092	-0.183	-0.035	-0.063	-0.040	-0.057	-0.026	-0.060	0.050	0.044
CMG9	0.209	0.616	0.135	0.473	0.205	0.409	0.255	0.576	0.304	0.577
CMG10	0.175	0.526	0.215	0.516	0.133	0.171	0.050	0.459	0.200	0.266

差が存在することがみられた。他の主枝数実験区でもこれと似た傾向がみられた（データ略）。

次に、CDMPFFD、ODMPFFD、CDMPN、ODMPN、CDMPNOおよびODMPNOの各数値についてORWの区別なく、主枝数実験区別に平均し、樹冠モデル群間で多重比較した（第6表）。その結果、いずれの主枝数実験区とも、CDMPFFD、ODMPFFD、CDMPNおよびODMPNの各平均値の樹冠モデル群間分離は良好であった（第6表）。また、多くの主枝数実験区で、CDMPFFD平均値あるいはODMPFFD平均値の大小関係は互いに似ていた。たとえば、これら平均値はCMG5やCMG6で最も大きく、CMG10で最も小さかった。CDMPN平均値とODMPN平均値についても上記同様な傾向がみられた。一方、多くの主枝数実験区でCDMPNO平均値とODMPNO平均値はCMG5やCMG6で最も大きく、CMG10で最も小さかった。しかし、これら以外では両平均値の大小関係は明らかでなかった。

6. 生産目標の多様化に対応する果樹園の光環境、園地当たり葉層純光合成量および1樹当たり葉量

緒言に記した生産農家の生産目標の多様化に対応する

には、DMPPFD、DMPNOおよびNLBに関する情報の入手が必要である。上述の果実品質に対する果実収量のバランスは果樹園の光環境に対するDMPNOのバランスに置き換えられる。そこで、これらの情報を入手するため、CMG1（3本主枝）のCDMPFFDを横軸、CDMPNOを縦軸に取ったORW別の散布図を作成した（第19図左）。さらに、CDMPFFDを横軸、NLBを縦軸に取ったORW別の散布図を作成した（第19図右）。そのうえ、幅員段階が4、5および6のデータに限り、CDMPFFDを用いたCDMPNOあるいはNLBの推定式（2次までのべき多項式）を作成した（第20図）。なお、緒言に記した生産目標の略号として、並品質果実の多量生産にはA、良品質果実の中量生産にはBおよび秀品質果実の少量生産にはCを用いた。A、BおよびCに対応するCDMPFFDとして、第20図横軸（CDMPFFD）の最小値近辺、中央値近辺および最大値近辺の座標（それぞれXA、XBおよびXC）を選定した。この場合、XAに320、XBに360およびXCに400とした（単位は $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ）。次にこれら数値を用いた幅員段階5のときのCDMPNO推定値は、A、BおよびCの順に、19.46、15.18および11.82（単位は $\text{kgCO}_2 \cdot (10\text{a})^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ）であった（第20図左）。また、幅

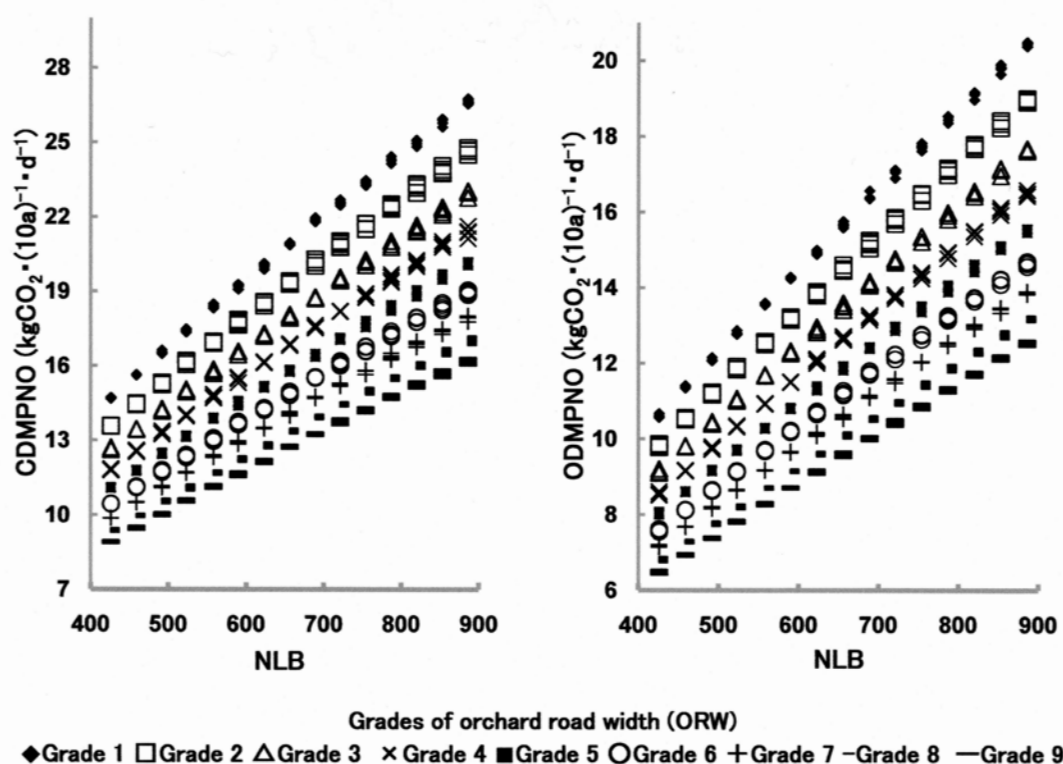


Fig. 13. Relations between leafy block numbers per 3D grid (NLBs) and CDMPPNOs (left) or ODMPPNOs (right) in CMG1 (3 PSBs). The ORWs refer to Table 2.

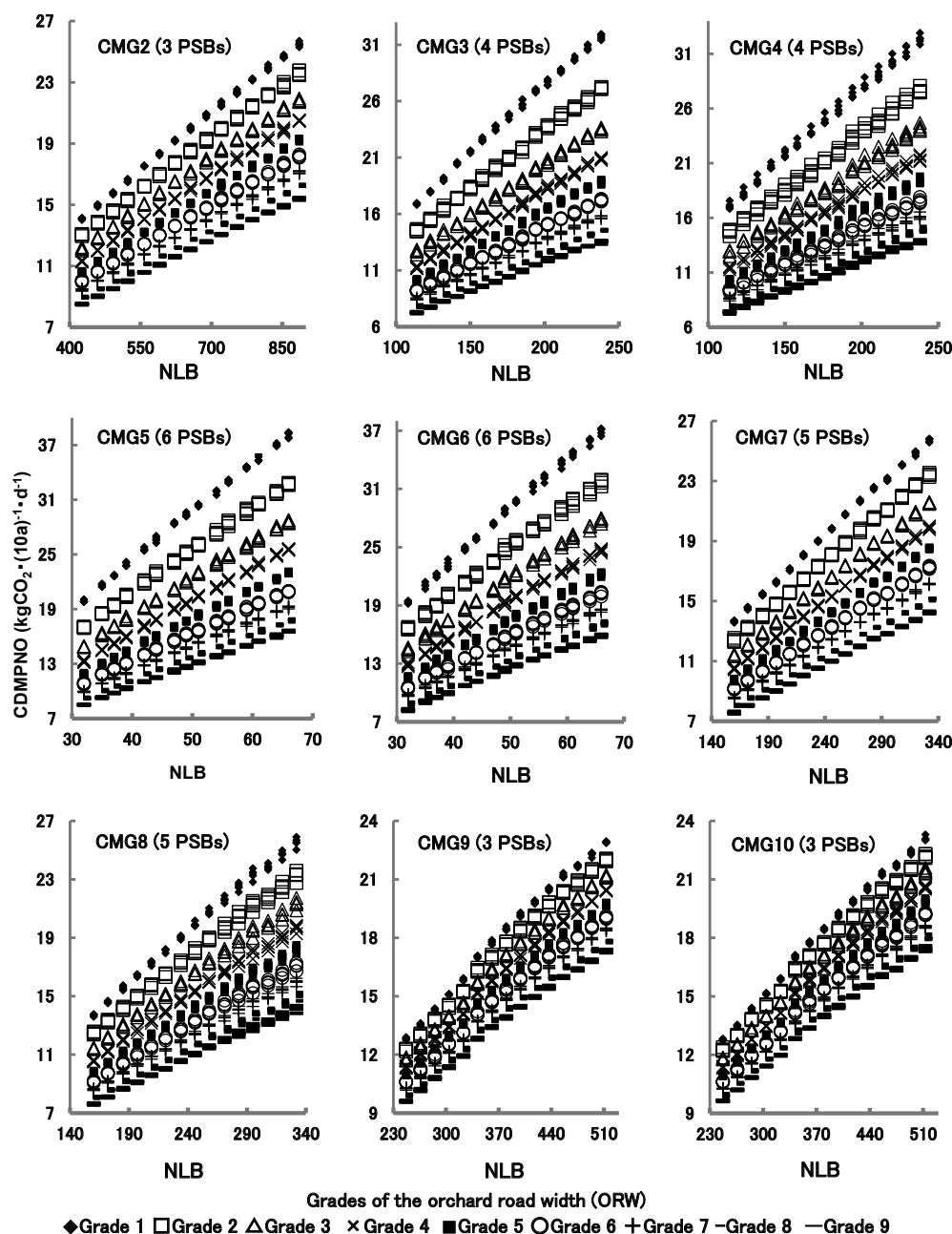


Fig. 14. Relations between leafy block numbers per 3D grid (NLBs) and CDMPNOs in each CMG. The ORWs refer to Table 2.

員段階5のときのNLB推定値は、A、BおよびCの順に、846個、625個および462個であった（第20図右）。園道幅員段階が4および6についても同様な推定計算を行った。

CMG1以外の樹冠モデル群についても、CMG1（第19図左）と同様の散布図を作成した（第21図）。このときの主枝数実験区は結果の2に記したものと同一である。そこで、第20図と同様な計算を行った。ただし、横軸の変域は樹冠モデル群により異なるため、XA、XBおよびXCは樹冠モデル群ごと選定した。一方、CMG1以外の樹冠モデル群の第19図右に対応する図については第9図

の横軸と縦軸を交換したもので掲載しなかった。A、BおよびCに対応するCDMPNOとNLBを3種類の園道幅員段階ごとに推定した。また、第20図と同等な図については略し、推定式と寄与率（R²）のみを第7表に示した。寄与率は細形樹冠モデル群（CMG3とCMG4）と超細形樹冠モデル群（CMG6）で低下したものの、これ以外の樹冠モデル群では極めて高かった。なお、第7表では各樹冠モデル群とも特定の主枝数実験区に限定したが、他の主枝数実験区の結果も第7表と同様であった（データ略）。

第8表には全ての樹冠モデル群における結果のほかに、果樹園設計上の諸元とも言うべき、南北樹幅制限値、東西樹幅制限値、樹高制限値および幅員の実長に加え、主枝数のデータも記した。ただし、整枝せん定処理の選択枝系列は省略した。同選択枝系列については既報（山本, 2022）を参照されたい。なお、CMG9とCMG10のブロック（立方体）の1辺長は28.57cm、これ以外の樹冠モデル

群では19.05cmなので、NLBの評価の際、この違いに留意する必要がある。

さらに、第8表には、生産目標A、BおよびCに対応する各樹冠モデル群のNLBとCDMPNOの値を示した。A、BおよびCに対応するCDMPNOの値の差から、果実品質の違いも予想できる。さらに、ORWを増減することでNLBとCDMPNOの変動も予想できる。ただし、NLBは

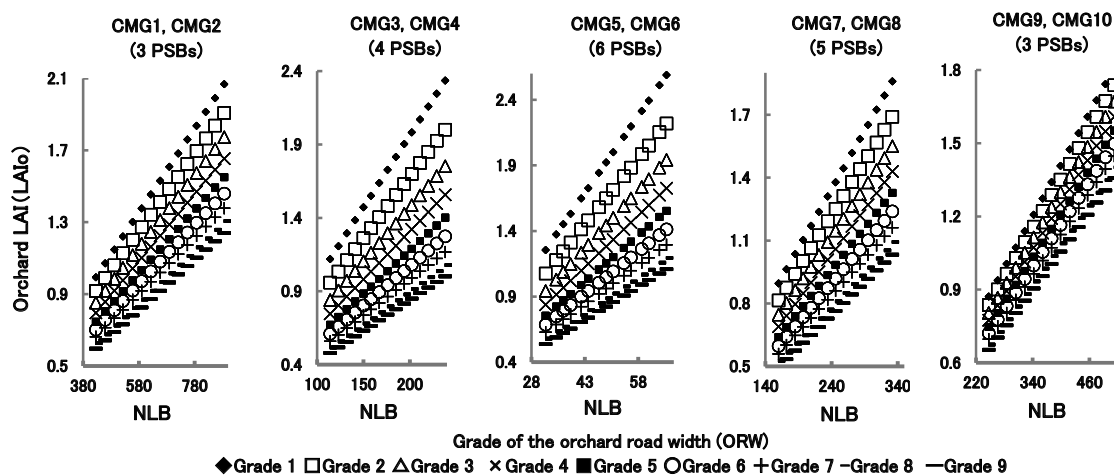


Fig. 15. Relations between NLBs and orchard LAI in each CMG. The ORWs refer to Table 2.

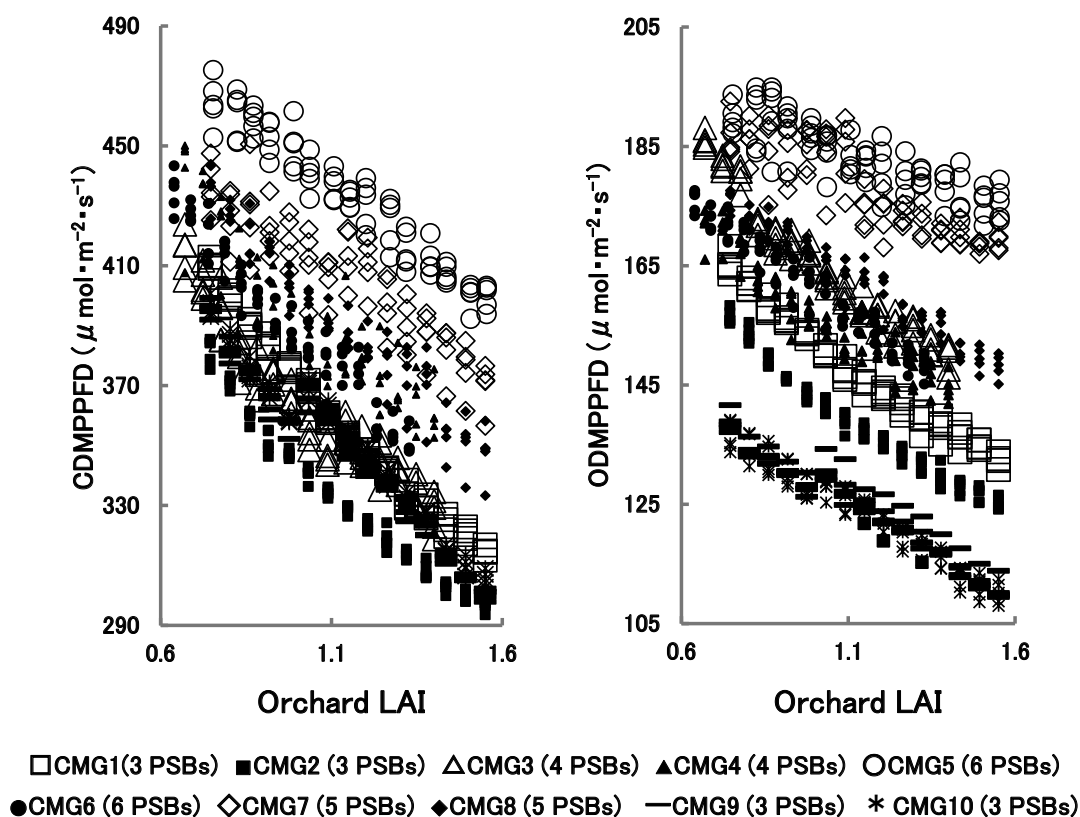
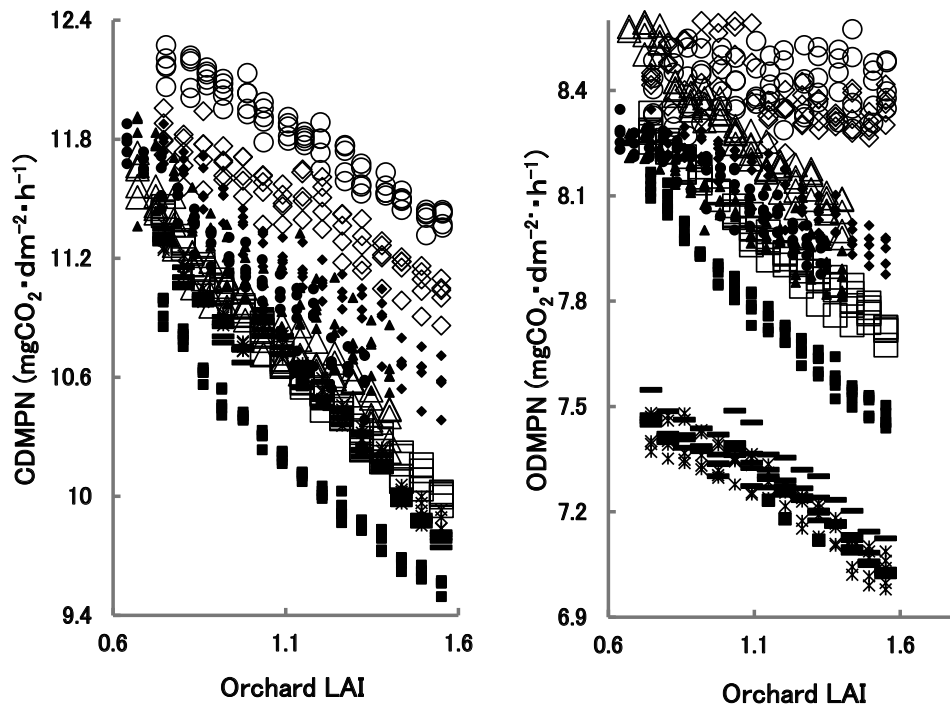


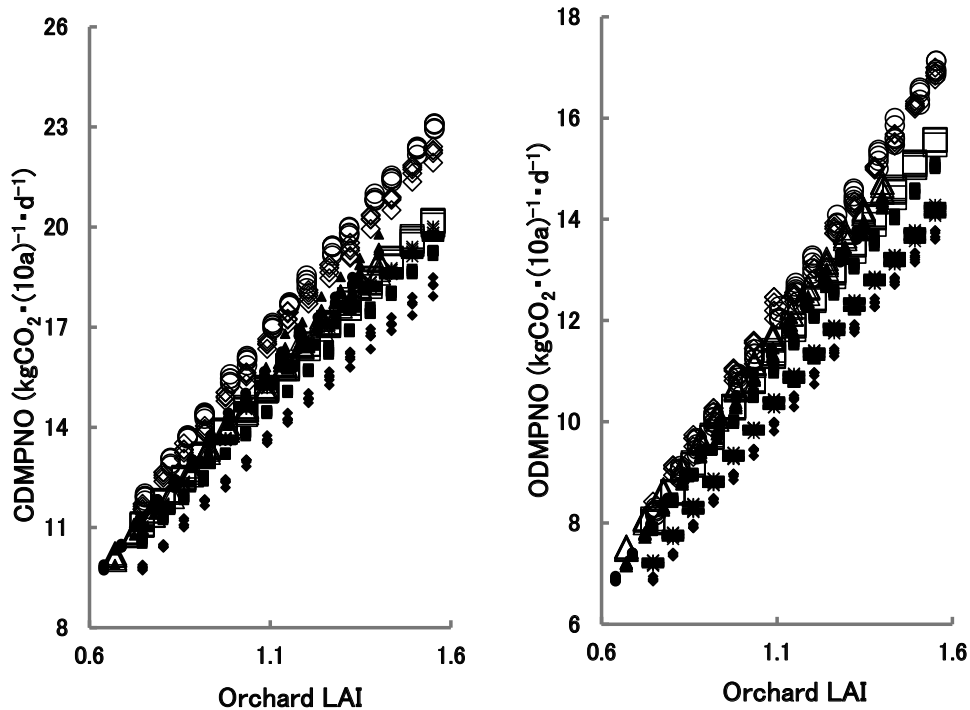
Fig. 16. Relations between orchard LAIs and CDMPPFDs (left) or ODMPPFDs (right) in the ten CMGs.

The grades of the orchard width were 5 in every CMG.



□CMG1(3 PSBs) ■CMG2 (3 PSBs) △CMG3 (4 PSBs) ▲CMG4 (4 PSBs) ○CMG5 (6 PSBs)
●CMG6 (6 PSBs) ◇CMG7 (5 PSBs) ◆CMG8 (5 PSBs) —CMG9 (3 PSBs) * CMG10 (3 PSBs)

Fig. 17. Relations between orchard LAIs and CDMPNs (left) or ODMPNs (right) in the ten CMGs.
The explanations of the figure refer to Fig. 16.



□CMG1(3 PSBs) ■CMG2 (3 PSBs) △CMG3 (4 PSBs) ▲CMG4 (4 PSBs) ○CMG5 (6 PSBs)
●CMG6 (6 PSBs) ◇CMG7 (5 PSBs) ◆CMG8 (5 PSBs) —CMG9 (3 PSBs) * CMG10 (3 PSBs)

Fig. 18. Relations between orchard LAIs and CDMPNOs (left) or ODMPNOs (right) in the ten CMGs.
The explanations of the figure refer to Fig. 16.

Table 6. Multiple comparisons of the means of CDMPPFDs, ODMPPFDs, CDMPNs, ODMPNs, CDMPNOs and ODMPNOs from each experiment of the number of PSBs between the ten CMGs. In each experiment, the fifteen grades of leafy block numbers per 3D grid are combined with the nine grades of orchard road width (n=675).

Number of PSBs	CMG	CDM- PPFD ^z	ODM- PPFD ^z	CDM- PN ^y	ODM- PN ^y	CDM- PNO ^x	ODM- PNO ^x
2	CMG1	333.1 f ^w	139.2 g	10.25 g	7.81 g	15.53 bcd	11.87 b
	CMG2	316.6 g	137.8 g	9.95 h	7.76 h	15.08 cde	11.80 b
	CMG3	372.1 e	160.2 d	10.92 e	8.21 c	15.68 bc	11.83 b
	CMG4	386.8 d	157.5 e	11.08 d	8.09 e	15.92 b	11.67 b
	CMG5	432.8 b	189.4 a	11.84 b	8.53 a	19.00 a	13.74 a
	CMG6	447.3 a	181.6 b	11.93 a	8.38 b	19.17 a	13.53 a
	CMG7	395.4 c	162.2 c	11.26 c	8.13 d	14.86 de	10.76 c
	CMG8	387.0 d	155.6 f	11.10 d	8.01 f	14.64 e	10.60 c
	CMG9	331.1 f	126.7 h	10.33 f	7.36 i	15.37 bcde	11.02 c
	CMG10	329.9 f	122.2 i	10.27 fg	7.24 j	15.33 bcde	10.86 c
3	CMG1	356.2 f	146.7 f	10.64 f	7.98 e	16.15 b	12.16 c
	CMG2	331.4 h	138.1 g	10.14 h	7.76 f	15.40 bcd	11.82 cd
	CMG3	381.1 d	164.0 c	11.07 d	8.24 c	15.94 b	11.92 cd
	CMG4	374.6 e	151.0 e	10.87 e	7.97 e	15.62 bc	11.50 de
	CMG5	432.6 a	191.1 a	11.83 a	8.64 a	19.11 a	13.91 a
	CMG6	436.7 a	171.1 b	11.78 a	8.22 c	18.92 a	13.27 b
	CMG7	399.0 b	172.1 b	11.37 b	8.34 b	15.00 cd	11.04 ef
	CMG8	392.9 c	160.1 d	11.19 c	8.10 d	14.76 d	10.71 f
	CMG9	347.0 g	124.4 h	10.55 g	7.29 g	15.74 bc	10.93 ef
	CMG10	349.7 g	123.0 h	10.58 fg	7.25 h	15.79 bc	10.88 f
4	CMG1	366.9 d	148.6 f	10.74 e	8.01 e	16.29 b	12.19 b
	CMG2	349.1 e	140.7 g	10.41 g	7.81 f	15.77 bc	11.88 b
	CMG3	366.1 d	166.8 c	10.95 d	8.33 b	15.75 bc	12.02 b
	CMG4	392.6 c	156.7 e	11.13 c	8.07 d	16.02 bc	11.65 bc
	CMG5	451.4 a	187.7 a	12.03 a	8.46 a	16.02 bc	13.63 a
	CMG6	419.5 b	173.0 b	11.59 b	8.27 c	18.61 a	13.35 a
	CMG7	349.1 e	140.7 g	10.41 g	7.81 f	15.77 bc	11.88 b
	CMG8	393.1 c	160.1 d	11.19 c	8.09 d	14.76 d	10.70 d
	CMG9	352.6 e	128.3 h	10.63 f	7.36 g	15.86 bc	11.04 cd
	CMG10	338.9 f	121.9 i	10.40 g	7.23 h	15.50 cd	10.84 d
5	CMG1	362.1 f	144.8 f	10.66 e	7.92 f	16.16 b	12.03 b
	CMG2	348.9 g	140.2 g	10.43 f	7.81 g	15.83 bc	11.89 b
	CMG3	390.2 c	163.9 d	11.20 c	8.26 c	16.06 bc	11.93 b
	CMG4	383.1 de	163.9 d	11.03 d	8.08 e	15.85 bc	11.66 b
	CMG5	446.3 a	186.7 a	11.96 a	8.44 a	19.21 a	13.61 a
	CMG6	407.8 b	176.3 b	11.47 b	8.37 b	18.42 a	13.49 a
	CMG7	381.4 e	166.8 c	11.13 c	8.26 c	14.68 d	10.92 c
	CMG8	388.0 cd	160.9 e	11.14 c	8.12 d	14.67 d	10.73 c
	CMG9	342.4 h	126.8 h	10.48 f	7.35 h	15.60 bc	11.02 c
	CMG10	331.1 i	117.8 i	10.27 g	7.14 i	15.30 cd	10.71 c
6	CMG1	326.0 h	136.4 f	10.12 h	7.75 f	15.34 bc	11.80 b
	CMG2	341.9 f	140.1 e	10.33 g	7.81 e	15.68 b	11.89 b
	CMG3	373.7 e	160.3 d	10.96 e	8.19 c	15.77 b	11.83 b
	CMG4	326.0 h	136.4 f	10.12 h	7.75 f	15.34 bc	11.80 b
	CMG5	432.5 a	183.4 a	11.80 a	8.43 a	18.96 a	13.60 a
	CMG6	405.6 b	178.0 b	11.45 b	8.41 a	18.40 a	13.56 a
	CMG7	379.5 d	168.6 c	11.13 d	8.31 b	14.66 c	10.99 c
	CMG8	399.1 c	159.4 d	11.25 c	8.08 d	14.84 c	10.69 c
	CMG9	346.1 f	129.2 g	10.54 f	7.41 g	15.71 b	11.12 c
	CMG10	331.9 g	123.6 h	10.31 g	7.30 h	15.35 bc	10.94 c

^zμmol·m⁻²·s⁻¹.

^ymg·CO₂·dm⁻²·h⁻¹.

^xkgCO₂·(10a)⁻¹·d⁻¹

^wDifferent letters indicate significance at 5% level by Tukey's multiple range test.

3Dグリッド中の葉ブロック数であるため、その把握やコントロールは困難である。それに代わる便法として、把握やコントロールが簡単な1樹当たりユニット数 (NU) を用いることが考えられる。そこでNLBによるNUの推定式 (第5図) を用いて、A、BおよびCに対応するNUを樹冠モデル群ごと算出し、第8表に記した。ただし、NUは本来整数であるが、園道幅員の段階が4、5および6の間ではNUの差は僅かなため、同表では小数点

以下1桁で表現した。なお、樹冠の設計に用いるユニットのサイズは樹冠モデル群によって異なるので、詳細は前報 (山本, 2022) を参照されたい。

考 察

結果の2におけるDMPPFD分散増大の原因として以下のことが考えられる。すなわち、CDSによる樹冠設計の際、ユニットの近接発生で葉層が重なることがあり、そ

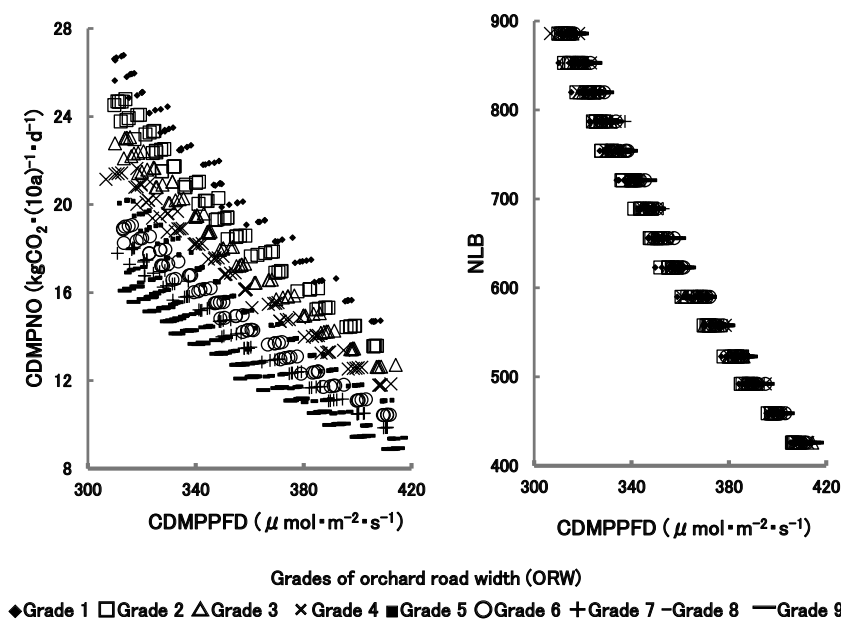


Fig. 19. Relations between CDMPPFDs and CDMPNOs (left) and that between CDMPPFDs and NLBs (right) at each grade of orchard road width (ORW) in CMG1 (3 PSBs). The ORWs refer to Table 2.

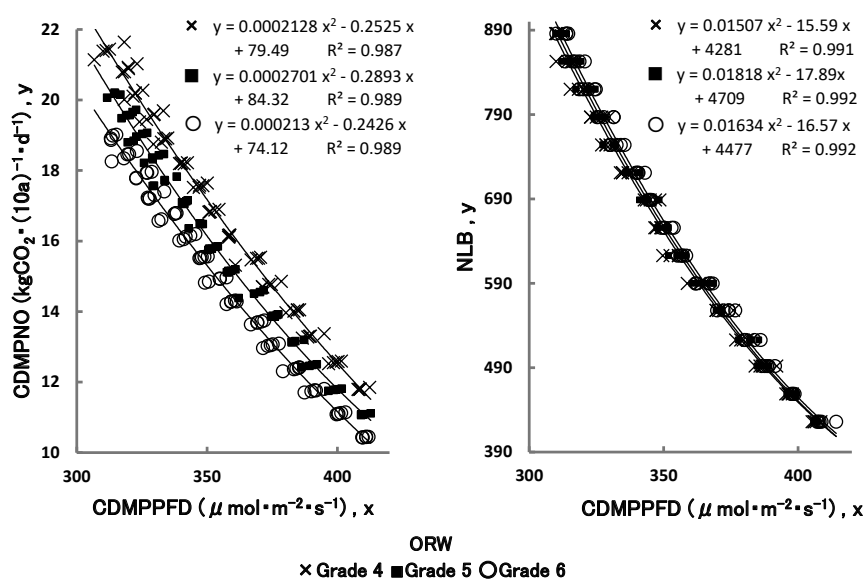


Fig. 20. Relations between CDMPPFDs and CDMPNOs (left) and that between CDMPPFDs and NLBs (right) at 4, 5 and 6 grades of orchard road width (ORW) and their estimation curves in CMG1 (3 PSBs). The ORWs refer to Table 2.

の部分の葉ブロックは1個とカウントされるため、葉ブロック数は減りやすい（山本, 2022）。このため、葉ブロック数微調節処理（山本, 2020）における葉ブロックの追加処理数が増え、樹冠モデルの形状が乱れやすく、結果的にDMPPFDの分散増大をもたらしたと考えられる。本報のように、1樹当たり葉量が著しく大きくなれば、主枝当たりユニット数も増え（第5図）、ユニットが近接発生しやすい（第2図）。また、超細形樹冠モデル群と細形樹冠モデル群では主枝が短いことにより、ユニット発生間隔が短くなり、上記傾向が強く現れる（山本, 2022）。

加えてこれらの樹冠モデル群では1樹割り当て空間が狭いため、葉ブロック追加位置も限られ、樹冠形が偏りやすくなり、DMPPFDの分散を大きくしたものと考えられる（第9図のCMG5, CMG6, CMG3およびCMG4）。一方、CMG1, CMG2, CMG9およびCMG10では1樹割り当て空間が広いいため追加位置に余裕が生まれ、樹冠形の偏りのような問題はほとんど発生しなかったと考えられる（第9図）。CMG7およびCMG8では東西樹幅が狭いので上記の分散は増大したものと考えられる（第9図）。

葉ブロック数微調節処理により、いずれも目標の葉ブ

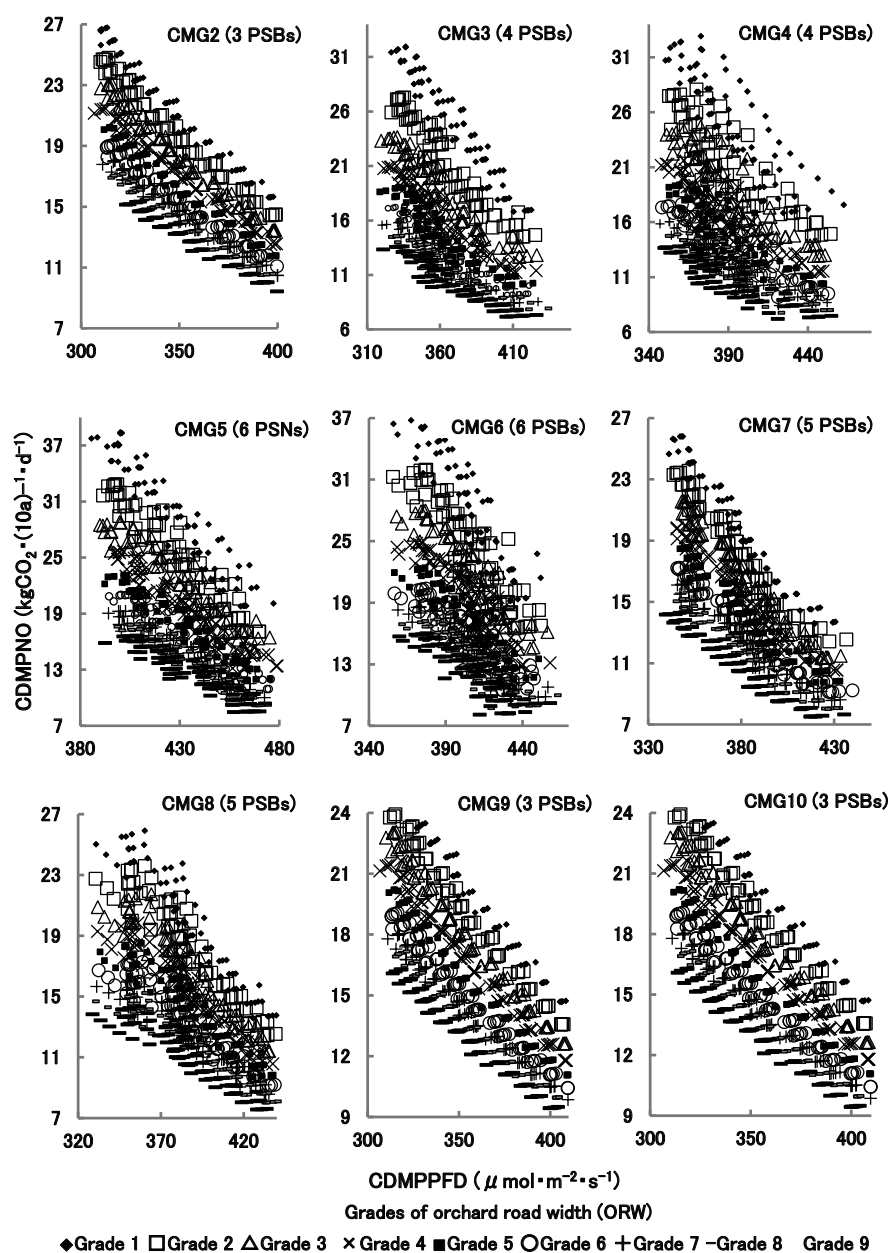


Fig. 21. Relations between CDMPPFDs and CDMPNOs in each CMG. The orchard road width (ORW) in each the grade refers to Table 2. PSB indicates the primary scaffold branch.

Table 7. Estimation formulas of amount of net photosynthate per orchard land area on a clear day (CDMPNO) using CDMPPFD (left) and that of leafy block numbers per 3D grid (NLB) using CDMPPFD (right) at 4, 5 and 6 grades of orchard road width (ORW) in each CMG (n=75).

CMG	Grade of ORW	Estimation formulas	R ²	Estimation formulas	R ²
		X: CDMPPFD ^z , Y: CDMPNO ^y		X: CDMPPFD ^z , Y: NLB ^x	
CMG1(3 PSBs)	4	$Y=0.0002128X^2-0.2525X+79.45$	0.987	$Y=0.01525X^2-15.71X+4302$	0.991
	5	$Y=0.0002701X^2-0.2893X+84.32$	0.989	$Y=0.01818X^2-17.89X+4709$	0.992
	6	$Y=0.000213X^2-0.2426X+74.12$	0.989	$Y=0.01634X^2-16.57X+4477$	0.992
CMG2(3 PSBs)	4	$Y=0.0005083X^2-0.4501X+108.9$	0.986	$Y=0.02964X^2-25.35X+5780$	0.990
	5	$Y=0.0005036X^2-0.4418X+105.8$	0.987	$Y=0.03071X^2-26.14X+5928$	0.991
	6	$Y=0.0005362X^2-0.4588X+107.0$	0.986	$Y=0.03336X^2-27.98X+5928$	0.990
CMG3(4 PSBs)	4	$Y=0.0004948X^2-0.5004X+136.2$	0.820	$Y=0.007094X^2-6.988X+1820$	0.864
	5	$Y=0.0005502X^2-0.5364X+140.1$	0.781	$Y=0.008335X^2-7.999X+2025$	0.832
	6	$Y=0.0004746X^2-0.4623X+121.5$	0.772	$Y=0.007961X^2-7.646X+1944$	0.827
CMG4(4 PSBs)	4	$Y=0.0004948X^2-0.5004X+136.2$	0.820	$Y=0.007054X^2-6.988X+1820$	0.864
	5	$Y=0.0005512X^2-0.5364X+140.1$	0.781	$Y=0.008335X^2-7.999X+2025$	0.832
	6	$Y=0.0004746X^2-0.4623X+121.5$	0.772	$Y=0.007961X^2-7.646X+1944$	0.827
CMG5(6 PSBs)	4	$Y=0.0005126X^2-0.6026X+184.1$	0.910	$Y=0.001763X^2-1.972X+571.7$	0.926
	5	$Y=0.00009207X^2-0.1359X+79.72$	0.914	$Y=0.000435X^2-0.8349X+328.5$	0.930
	6	$Y=0.00003398X^2-0.4318X+139.3$	0.859	$Y=0.001486X^2-1.756X+530.8$	0.881
CMG6(6 PSBs)	4	$Y=-0.0002138X^2+0.01766X+47.09$	0.810	$Y=-0.0001199X^2-0.3570X+213.6$	0.845
	5	$Y=-0.000179X^2+0.00927X+42.89$	0.780	$Y=-0.00008068X^2-0.377X+215.0$	0.817
	6	$Y=-0.00004211X^2-0.09074X+59.22$	0.817	$Y=0.0003027X^2-0.6914X+270.9$	0.849
CMG7(5 PSBs)	4	$Y=0.0004218X^2-0.4455X+123.7$	0.956	$Y=0.009294X^2-9.378X+2467$	0.966
	5	$Y=0.000466X^2-0.4716X+126.3$	0.957	$Y=0.01051X^2-10.33X+2657$	0.966
	6	$Y=0.0004588X^2-0.4716X+120.8$	0.963	$Y=0.01087X^2-10.58X+2698$	0.972
CMG8(5 PSBs)	4	$Y=-0.0001759X^2+0.03907X+26.72$	0.912	$Y=-0.001445X^2-0.7459X+755.6$	0.926
	5	$Y=-0.0002081X^2+0.07096X+18.19$	0.902	$Y=-0.0006553X^2-1.356X+872.3$	0.932
	6	$Y=-0.0002035X^2+0.0727X+15.84$	0.902	$Y=-0.001598X^2-0.6419X+737.9$	0.924
CMG9(3 PSBs)	4	$Y=-0.0002264X^2+0.05896X+23.12$	0.940	$Y=-0.0005627X^2-2.468X+1303$	0.961
	5	$Y=-0.0002536X^2+0.07935X+18.80$	0.938	$Y=-0.001491X^2-1.873X+1210$	0.960
	6	$Y=-0.0002195X^2+0.05971X+21.04$	0.938	$Y=-0.0009179X^2-2.255X+1275$	0.959
CMG10(3 PSBs)	4	$Y=-0.0003217X^2+0.1189X+14.13$	0.948	$Y=-0.002756X^2-1.109X+1105$	0.965
	5	$Y=-0.0002443X^2+0.07013X+21.16$	0.948	$Y=-0.001114X^2-2.221X+1293$	0.966
	6	$Y=-0.0002096X^2+0.05037X+23.39$	0.948	$Y=-0.0005591X^2-2.588X+1356$	0.956

^zμmol・m⁻²・s⁻¹.

^ykgCO₂・(10a)⁻¹・d⁻¹.

^xblock.

ロック数に最終的に到達できたとは言え、超細形樹冠モデル群、細形樹冠モデル群などにおける葉量が大きいための主枝数、ユニットのサイズあるいはユニット発生間隔などについて今後改良する必要がある。

CMG9とCMG10ではDMPPFD分散そのものは小さかったものの、設定NLBが約330付近からCDMPFDの値が上方にずれた（第9図）。このずれの原因として以下のことが考えられる。1樹割り当て空間が極めて広い超太形樹冠モデル群では、ユニットの重なりが少ないため葉ブロック数の目減りも少ない。さらに、設定NLBが330付近より大きくなると逆に実現NLBが設定NLBを大きく上回った（第6図）。つまり、設定NLBが330を過ぎると葉ブロックの削除が始まる。この場合、余計な葉ブロックを乱数で満遍なく削除でき、樹冠形の乱れや偏り

が起きにくいので、DMPPFD値が設定NLBが330以下のときに比べ上方にずれたものと考えられる。

本報を含め、筆者らのこれまでの研究では、葉層の光合成だけをとりあげ、果実（松井, 1989）や緑色枝部分の光合成には触れなかった。本報に用いた純光合成速度の重回帰推定式（山本ら, 1995）はこれらの推定機能を有していないためである。ただし、これら器官表面積の大きさや緑色を保つ期間の長さから推察して、真夏における果実や緑色枝部分の光合成量は小さいものと考えられる。

結果の2に記したNLBと樹冠形状値の相関関係（第4表）から以下のことが推察できる。すなわち、NLBが大きくなると樹冠内に葉層が充満するためLAOは増大し、葉層が連続分布することでMCFNSやMCFVDも増

Table 8. In the left side of the table, components in designing orchards, i.e., limit of south-north width (SNW), limit of east-west width (EWW), limit of tree height (TH) and orchard road width (ORW) in each crown model group (CMG) together with numbers of PSB (NPSB) are shown. In the middle of the table, three levels of CDMPPFD corresponded to three plans for cultivation of fruit trees, viz. many fruits with ordinary quality (A), moderate fruits with good quality (B) and slight fruits with excellent quality (C) are shown. In the right side of the table, net photosynthate per orchard land area on a clear day (CDMPNO), leafy block numbers per 3D grid (NLB) and number of units per tree (NU) which are calculated using the three CDMPPFDs and the estimation formulas shown in Table 7. NUs refer to Fig. 5.

CMG	NP-SB	SNW	EWW	TH	Stage in ORW	ORW	CDMPPFD			CDMPNO			NLB			NU		
							A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
							Unit ^z			Unit ^y			block					
CMG1	3	4.0	4.0	3.5	4	1.714	320	360	400	20.44	16.13	12.50	836	623	458	33.3	25.7	19.7
		4.0	4.0	3.5	5	2.095	320	360	400	19.40	15.18	11.82	846	625	462	33.7	25.7	19.9
		4.0	4.0	3.5	6	2.476	320	360	400	18.30	14.39	11.16	848	629	463	33.8	25.9	19.9
CMG2	3	4.0	4.0	2.0	4	1.714	300	340	380	19.62	14.63	11.26	843	587	427	33.6	24.4	18.6
		4.0	4.0	2.0	5	2.095	300	340	380	18.58	13.80	10.64	850	590	429	33.8	24.5	18.7
		4.0	4.0	2.0	6	2.476	300	340	380	18.42	13.79	10.88	855	590	432	34.0	24.5	18.8
CMG3	4	1.9	1.9	3.5	4	1.142	330	370	410	20.37	15.07	11.75	230	161	120	12.9	10.4	8.9
		1.9	1.9	3.5	5	1.523	330	370	410	18.55	13.61	10.44	238	169	128	13.2	10.7	9.2
		1.9	1.9	3.5	6	2.476	330	370	410	17.11	12.49	9.61	234	163	119	13.0	10.5	8.9
CMG4	4	1.9	1.9	2.0	4	1.142	360	400	440	20.33	15.36	12.09	247	191	161	13.5	11.5	10.4
		1.9	1.9	2.0	5	1.523	360	400	440	18.51	13.89	11.01	226	160	121	12.7	10.4	8.9
		1.9	1.9	2.0	6	2.476	360	400	440	16.59	12.53	9.99	223	159	120	12.6	10.3	8.9
CMG5	6	1.0	1.0	3.5	4	0.761	390	430	460	27.08	19.79	15.39	68	50	37	10.8	9.7	8.9
		1.0	1.0	3.5	5	0.952	390	430	460	23.89	18.00	13.57	67	50	37	10.7	9.7	8.9
		1.0	1.0	3.5	6	1.142	390	430	460	22.62	16.49	12.60	68	51	37	10.8	9.8	8.9
CMG6	6	1.0	1.0	2.0	4	0.761	380	415	450	22.94	17.61	11.75	60	44	28	10.3	9.3	8.4
		1.0	1.0	2.0	5	0.952	380	415	450	20.50	15.83	10.72	60	45	29	10.3	9.4	8.4
		1.0	1.0	2.0	6	1.142	380	415	450	18.66	14.31	9.86	60	44	29	10.3	9.4	8.5
CMG7	5	4.0	1.3	3.5	4	1.142	360	395	430	18.00	13.55	10.14	296	213	153	25.1	19.6	15.6
		4.0	1.3	3.5	5	1.333	360	395	430	16.90	12.70	9.65	298	214	156	25.3	19.6	15.7
		4.0	1.3	3.5	6	1.523	360	395	430	15.70	11.83	9.07	298	215	158	25.2	19.7	15.9
CMG8	5	4.0	1.3	2.0	4	1.142	340	385	430	18.70	14.72	10.04	335	253	168	27.8	22.2	16.5
		4.0	1.3	2.0	5	1.333	340	385	430	18.27	14.67	10.23	335	254	168	27.7	22.3	16.5
		4.0	1.3	2.0	6	1.523	340	385	430	17.04	13.67	9.48	335	254	166	27.7	22.3	16.4
CMG9	3	6.0	6.0	3.5	4	1.714	310	350	390	19.64	16.02	11.68	484	370	255	14.9	12.2	9.4
		6.0	6.0	3.5	5	2.000	310	350	390	19.03	15.51	11.17	486	372	253	15.0	12.3	9.4
		6.0	6.0	3.5	6	2.285	310	350	390	18.46	15.05	10.94	488	373	256	15.0	12.3	9.5
CMG10	3	6.0	6.0	5.0	4	1.714	310	350	390	20.07	16.34	11.57	496	379	253	15.2	12.4	9.4
		6.0	6.0	5.0	5	2.000	310	350	390	19.42	15.78	11.35	497	379	257	15.3	12.4	9.5
		6.0	6.0	5.0	6	2.285	310	350	390	18.86	15.34	11.15	500	382	262	15.3	12.5	9.6

^zμmol・m⁻²・s⁻¹.

^ykgCO₂・(10a)⁻¹・d⁻¹.

大する。また、樹冠内部の葉層の割合も高まることでPNLESも上昇する。よって、これらとNLBとの間には高い正の相関が生まれる。一方、樹の寸法が変わらないままNLBが増大すればPSLBは低下するため、両者間には負の相関関係が生まれる（第4表左）。

一方、光環境データ（CDMPPFDやODMPPFD）とLAO、MCFNS、MCFVDおよびPNLESとの間には負の高い相関関係が認められ、PSLBとの間には正の相関が認められた（第4表）。この理由として、1樹当たり葉量の増大が樹冠形状値の変化をもたらすが、この変化の多くが光環境の悪化をもたらすためと考えられる。

NLBが等しい条件で行った既報（山本, 2016）の実験では、LAOとDMPPFDの間に正の相関関係が認められた。その理由としてLAOの増大が地面に直接到達する光を減少させ、樹冠内光環境の改善に有利に働くものと考えられた。しかし、本報のようにNLBが広い範囲に

わたるとき、両者間には負の相関がみられた（第4表右）。この原因として、LAOの増大による光環境の改善よりもNLBの増大による光環境の悪化の方が勝るためと考えられる。

幼樹が成木になるまでの、あるいは春先から夏までの樹冠内光環境の変化から、葉量の増加による樹冠内光量の減少は明らかである。しかし、このことを実験的に比較した例はほとんどない。果実の収量や品質に関連する適正葉量の評価は重要である（高橋, 1985）。よって、栽培試験では葉量あるいは葉面積指数が計測されるが、樹の全葉を採取したうえで葉面積計を用いて計測した例は稀である。代わりの調査方法として、葉長・葉幅と葉面積の数量的関係（鈴木, 1964）、枝量と葉数の数量的関係（Boyton・Harris, 1950; Barlow, 1980; Johnson・Lakso, 1985; 浅田, 1989）などが用いられた。しかし、これらの間接的手法を用いる場合でも、測定精度の限界や計測の

ための所要労力から、成園の段階で数多くの樹を対象とする計測は困難と考えられる。葉量の評価が困難であれば葉量のコントロールも困難になる。

樹が密接に並ぶほど隣樹の陰がかかり、果樹園が暗くなることを定量的に計測した報告はほとんどない。太陽の高度が大きければ、樹陰は自樹周辺の狭い範囲に限られるが、幅員が小さければ隣樹にも及ぶ。また、太陽の高度が小さければ、樹陰は隣樹まで及ぶ。日の出や日没のように太陽の高度が極めて小さいときは、ORWが大きくても樹陰の影響は限りなく遠くまで及ぶ。ただし、この場合の投射光水平面強度は極めて小さいので、水平の葉への影響は小さい。また、一部の樹冠モデル群および一部の主枝数実験区において光環境とORWとの間の偏相関が低下した（第5表）。その原因として、DMPPFD分散の増大が影響したものと考えられる。また、晴天日に比べて曇天日の偏相関が高かった理由として、DMPPFD分散は曇天日の方が小さいためであろう。

本実験の結果、果樹園の光環境に及ぼすORWの影響は大きくないものの、DMPNOに及ぼす影響は大きいことが明らかになった（第13図および第14図）。したがって、ORWは園地の物質生産を左右する重要な要因になる。

物質生産性の指標として、果実収量は容易に調査できるため、栽培試験ではしばしば取り上げられた（岸本・清家, 1972; 小野, 1985; 橘ら, 1987; 神戸・小野, 1992; 倉橋・高橋, 1995; 伊藤, 2018）。しかし、果実収量には多くの要因が関係するため、果実収量のみを用いて果樹園の物質生産性を比較するときは注意が必要である。また、多くの栽培試験では果実収量とともに実験材料を解体して求めた乾物生産量や分配が報告された（小野, 1985; 猪俣ら, 1998; 吉田ら, 2006）。しかし、解体調査時期や調査個体数には限界がある。また、Monsi・Saeki (1953) の生産構造説に準じて層別刈り取り調査を行い、各器官別乾物生産量の垂直分布図が作成された（小野, 1985; 猪俣ら, 1998; 黒田・千葉, 2002）。しかし、器官分布の非ランダム性が強い栽培果樹における垂直分布図の有効性については疑問を生じる。

本報では果実収量や乾物生産量の代わりに、DMPNOを扱った。植物が産出する物質のほとんどが光合成産物由来のものである。したがってDMPNOは単純な指標とは言え、果樹園の潜在的な物質生産能力を示すものと考えられる。DMPNOを左右する大きな要因は葉層の純光合成速度である。純光合成速度に影響する光環境以外の

要因として土壌水分欠乏や要素欠乏などが考えられる。しかし、本報に用いた純光合成速度の重回帰式（山本ら, 1995）は、これらの影響を避けた実験圃場で得られたものである。

栽植密度（10a当たりの栽植本数）は果樹の栽培書に数多く記述される。しかし、栽植密度のみでは幅員の情報を欠くため、栽植方式と切り離して用いると危険である。また、樹幅制限が設定されても樹冠上部で隣接樹列の樹冠に接していることが多い。しかし、本報のような基礎研究では、幅員を厳格に取り扱う必要がある。よって栽植密度については第2表の中で参考データとして示した。

これまでの果樹の栽植密度研究については平野の総説（1989）に詳しく記述されているが、リングなどのわい化栽培が進んだ西欧では規模の大きい試験が行われている（Emerson・Haydea, 1975; Jackson, 1988）。また、黒田ら（1996）はリング樹の密度効果を明らかにするため、植物群落における密度効果理論（Shinozaki・Kira, 1956）をリング樹に当てはめて実験を行い、多くの実験を継続した。多数個体を用いて計測した点では貴重な実験である。しかし、実験圃場中心から放射線状に樹を配列するなどの特異な栽植方式、1樹当たり葉量の厳密な把握とコントロールを欠くなどの点で本報の実験設定とは大きく異なった。この場合でも光合成については計測していない。また、橘らはカンキツの栽植密度について一連の実験を行い（橘ら, 1987; 橘・中井, 1989）、葉量について詳細な調査を行ったが、光環境や光合成の計測は行っていない。

結果の5の解析で、ORWの段階を4、5および6に限定した（第2表）。しかし、果樹園作業の機械化・省力化、超密植栽培による園地収量の飛躍的増大などを展望したとき、本報のORW段階の範囲（段階1～段階9）が決して広すぎるとは思われない。

果樹の新しい生産システムに関する栽培試験では、果実収量や品質を中心に従来システムと比較することが多いが（中央果実協会, 2018）、光環境、光合成速度あるいは園地当たり葉層純光合成量などの比較は必ずしも十分ではない。また、複数の生産システムの比較に当たって、園地当たりの葉量を厳密に等しくすることは困難である。しかし、結果の2に記したように、光環境に及ぼす1樹当たり葉量の影響が極めて大きいことを考慮すると、本報の結果（第8表）は上述の栽培試験での混乱を整理、解

決するための参考情報になるだろう。

本実験結果の傾向は数値こそ異なるものの、'ふじ'以外の樹種・品種にも当てはまるものと考え、その根拠として以下のことをあげる。異なる樹冠形の間の光環境良否の序列に関するこれまでの調査から、園地当たり葉量を等しくすれば、この序列は樹種・品種に関係なく類似する（山本, 2016）。すなわち、幾何学的手法で合計528個の樹冠形（ソリッドモデル）を作成し、実験材料としてリング'ふじ'とともにセイヨウナシ、オウトウ、カキ、およびクリの各1品種を用いてCDMPPFDやODMPPFDを推定した。そして、528個の樹冠形におけるリング'ふじ'のCDMPPFDあるいはODMPPFDに対する他品種のCDMPPFDあるいはODMPPFDの相関係数を調査したところ、いずれも0.97以上であった。つまり、樹種の違いによるCDMPPFDやODMPPFDの数値上の違いがあっても、これら数値の大小関係は互いに類似していた。要するに園地当たり葉量を等しくする条件のもとでは、葉ブロックの積木構造（ソリッドモデル）を変えないかぎり、葉ブロックの中味に関係なく光環境良否の序列はほとんど変わらない。さらに、未調査であったクリとセイヨウナシを除く上記3樹種それぞれにおけるCDMPPFDとCDMPNあるいはODMPPFDとODMPNの間の散布図を作成したところ、相関はいずれも高かった（山本, 2018）。この報告では散布図のみを示したので、このときの相関係数を計算したところ、CDMPPFDとCDMPNあるいはODMPPFDとODMPNの相関係数はリングでは0.989あるいは0.967、カキでは0.982あるいは0.972およびオウトウでは0.984あるいは0.997であった（未発表）。樹冠形が同じであれば、本報に記したCDMPNやCDMPNOの序列は他の樹種、品種にも当てはまるものと考えられる。

結果の2, 3および4から、NLBの増大あるいはORWの減少によりDMPFFDやDMPNが減少するが、DMPNOは増大することが明らかになった。葉果比を変えなければ、NLBの増大により果実数は増えるものの、果樹園光環境は悪化するため、同化産物の果実当たり分配量は減少し、果実品質も低下する。また、樹種によっては着色も進まない。一方、NLBの減少により、果実数は減るが、果樹園光環境は改善するため、同化産物の果実当たり分配量は増大し、果実品質も向上する。また、樹種によっては着色も進む。また、摘果処理により葉果比を変えるときには葉層の光環境はほとんど変わらない。さ

らに、結果の5で明らかなように、樹幅や樹高が異なる樹冠モデル群の間には上記数値レベルに差が生じることが見出された。上述の性格は緒言に記した高品質果実の多収かつ安定的生産を希求するうえで重大である。

結果の6に記した生産目標は果実品質と収量に絞ったものである。しかし、生産目標は本報に記したものに限らない。たとえば、経営面での改善目標、あるいは機械化や省力化、地球環境保全への目標もあるだろう。

本報を含む筆者の一連の研究（山本, 2015, 2016, 2017, 2018, 2020, 2021, 2022）には、これまでの植物群落の光環境や物質生産の研究に用いられた計測手法（以下、従来法）とは異なるモデル手法を用いた。そこで、従来法とモデル手法の比較およびモデル手法の意義について最後に考察したい。

Monsi・Saeki (1953) は曇天日に限定したうえで、光センサを群落外上部に水平に置いたときの計測値 (I_o) に対する群落内任意の深さに水平に置いたときの計測値 (I) の比 ($I/I_o < 1$) を計測した。 I/I_o の数値は同じ傾斜角度の葉が水平方向にランダム分布する植物群落の物質生産の解析に用いられた。その後の多くの研究者により、 I/I_o は葉層中の光の透過率 (Monteith, 1965; Pearceら, 1967) あるいは $1 - I/I_o$ は葉層による光の吸収率 (Barrittら, 1991) と表現された。しかし、 I の数値には光センサに天空から直接到達する光成分が含まれ、 $1 - I/I_o$ の数値には葉層から上向きに反射する光成分の多くが含まれない。よって、 I/I_o は当初使用された相対的光強度（あるいは相対照度）と表現されるべきであろう。また、Monsi・Saeki (1953) は I/I_o に対する純光合成速度の数量的関係を直角双曲線で与えることで植物群落の光合成量を推定計算した。その後、小型植物群落への同化箱法の使用が可能になり、上記数量的関係が具体的に明らかにされた（田中, 1972）。また、Monsi・Saeki (1953) の仮定条件には含まれない、晴天日の太陽光線や葉の傾斜角度の違いによる影響などが明らかにされた（黒岩・門司, 1963; 黒岩, 1968）。さらに、葉の傾斜角度分布と葉量を用いた葉層中の直射光割合に関する数値計算が行われ、この計算結果を加味することで晴天日を含む全天候下における群落光合成量の推定が行われた（Horie・Udawawa, 1971）。一方、Monsi・Saekiの仮定条件の一つ、葉量分布のランダム性にも疑問が投げかけられ（Allen, 1974）、非ランダム性の強い広畝作物やクワなどの葉数が比較的少ない植物群落において、 I

／ I_o 計測の代わりに、モンテカルロ法が用いられた (Oikawa, 1977; 伊藤, 1995). すなわち、コンピュータを用いて様々な傾斜角度や方位角度を有する平行光線 (beam) を発生させることで、葉面にbeamが衝突する頻度を計算し、光環境や光合成量の評価に結びつけられた。

上述の小型作物と異なり、林木や果樹では、 I/I_o の計測場所数と計測時刻数を一度に多く取れない、同化箱法の利用が実質的に不可能などの困難が存在する。加えて、1個体当たり着葉数が数千枚から数万枚に及ぶ植物群落へのモンテカルロ法の適用も困難であろう。とりわけ栽培果樹では、毎年大量の枝を剪除し、かつ同一品種でも栽培者ごと異なる整枝せん定が施されるため、樹冠は多様な人工的形状を有する。したがって、葉量分布の非ランダム性は全方向とも極めて強い。しかしながら果樹分野ではHeinicke (1963) 以降、相対的光強度 (I/I_o) の計測が続けられ、今日に至っている (Smart, 1973; Lakso・Musselman, 1976; 森岡, 1978; 小野, 1985; 文室・村田, 1987; 荒川ら, 1999; 黒田・千葉, 2002). また、ヘッジロー仕立て果樹園を対象にした単純な数式モデルを用いた研究の中でも、相対的光強度 (I/I_o) が使われている (Jackson・Palmer, 1971; Charles-Edwards・Thorpe, 1976).

相対的光強度 (I/I_o) の計測結果を用いた樹冠内光環境の表示方法として、ある方向に沿った I/I_o 平均値のプロフィル線、上面から見たときの I/I_o データの等高線、グリッド断面における各ブロックへの I/I_o 数値表記などが用いられた (Heinicke, 1963; Charles-Edwards・Thorpe, 1976; 森岡, 1978; 小野, 1985; 神戸・小野寺, 1992; Kikuchiら, 1994; 倉橋・高橋, 1995). しかし、整枝せん定作業により樹冠内に極めて大きい空隙が不規則に散在するうえに、計測時刻や計測場所が限定される栽培果樹では、上述のプロフィル線や等高線の正確な作図や樹冠全体としての I/I_o 平均値の正確な算出は不可能である。光環境とは異なるが、リング果実の商品価値を有する表面着色と I/I_o の関係が報告されている (Heinicke, 1966). しかし、着色の調査にもかかわらず晴天日の計測が行われていないことは問題である。

I/I_o の計測で最も懸念されることは、散乱光下でも計測場所内 (たとえばグリッドを構成する各ブロック内) に発生する明るさのむら (葉層の陰になる部分とされない部分の混在) であり、樹冠の空隙が大きく、かつ

グリッドの網目が大きいほど計測部位の選定に苦慮する。特に晴天日の斑光がセンサ受光部に混入するときの誤差は極めて大きくなる。さらに、傾いた葉に太陽光が垂直に当たるときの葉面受光強度はそのときの水平面光強度の数倍にもなることがある。晴天日の計測が敬遠されてきた背景には、上記の問題が無視できないためであろう。ただし、明るさのむらの本質は曇天日でも変わらないものと筆者は考える。

上述の作物分野でなされた対応が果樹分野で全くみられないまま、Heinicke (1963) 以来の計測手法が今日まで続いた背景の一つとして、上述の果樹に特有な数多くの困難が考えられる。緒言に記したように、筆者らはこれらの困難を解決するために基礎研究を重ねてきた。そしてこれらの手法と研究成果を組み合わせることで、実験の準備や現場計測の代わりにモデル手法を用いることにより、晴天曇天を問わず、全葉・全時刻の葉面受光強度分布と葉層の純光合成速度分布のデータを迅速に入手できた。また、これらのデータを3次元配列変数に格納保存するとともに、様々な計算に用いた。また、実験設定上の諸情報 (投射光データ、果樹園栽植方式、樹幅・樹高、葉量、整枝せん定の選択枝) および計算される諸データ (枝座標データ、樹冠形状値など) の迅速な取り扱いが可能になった。つまり、モデル手法であるとは言え、上述の果樹分野に特有な困難のほぼ全てを解決できたものと考えられる。特に枝座標データと3Dグリッドを組み合わせた葉ブロックの3次元配列データの入手は果樹における葉量分布の非ランダム性を取り扱ううえで大きな前進と言える。さらに、CDS法による枝座標データの入手は現場計測を不要とし、この方面の研究を進めるうえで大きな前進と言える。

既報でも考察したように、モデル手法では、葉ブロック内の葉数、個葉面積、葉齢や葉形質、葉面湾曲の無視、葉の空間配列、葉面の傾斜角度と方位角度の分布などについて全葉ブロックを通じて画一的な取り扱いを行った。この画一的な取り扱いにより計算時間の短縮が可能になり、樹冠全体として見たときの葉量の非ランダム性に大きく近づけることができたものと考えられる。しかし、上記の葉ブロックの中味に関する画一的な取り扱いから生じる誤差については、デジタルとアナログの間の誤差のように、残された解決すべき課題として今後可能な限り検討したい。

摘 要

1樹当たり葉量と園道幅員の違いが果樹園の光環境、葉層の純光合成速度および園地当たり葉層純光合成量に及ぼす影響を明らかにするため以下のモデル実験を行った。10種類の樹冠モデル群それぞれについて、1樹当たり葉量（1樹当たり葉ブロック数）が15段階になるように375個の樹冠モデルをCDS法により設計した（合計3,750個の樹冠モデル）。また、各樹冠モデルの樹冠形状値を算出した。各樹冠モデルそれぞれを南北列並木植えとして、9段階の園道幅員を組み合わせ果樹園モデルを作成した（合計33,750個の果樹園モデル）。次に、OLEASなどを用いて各果樹園の光環境と光合成を解析した。その結果、夏季（8月）の晴天日と曇天日とも、1樹当たり葉ブロック数の増大により、葉面受光強度の日平均値（CDMPPFDとODMPPFD）と葉層純光合成速度の日平均値（CDMPNとODMPN）は顕著に減少した。さらに、1樹当たり葉ブロック数（NLB）と複数の樹冠形状値との間に高い正の相関関係が認められた。また、園道幅員の減少によりCDMPPFD、ODMPPFD、CDMPNおよびODMPNが減少した。園地面積当たり葉面積指数（園地LAI）を共通の基準として、果樹園の光環境と葉層純光合成速度あるいは園地当たりの葉層純光合成量（CDMPNOおよびODMPNO）を樹冠モデル群間で比較したところ、多くの樹冠モデル群間でCDMPNOおよびODMPNOの大小関係が見出された。上記解析結果を用いて、秀品質果実の少量生産、良品質果実の中量生産あるいは並品質果実の多量生産のような生産目標の多様化に対応するCDMPNO、ODMPNOおよびNLBを推定した。

引用文献

- Allen, L. H. Jr. 1974. Model of light penetration into wide-row crop. *Agronomy Journal*. 66: 41-47.
- 荒川 修・塩崎雄之輔・菊池卓郎. 1999. リンゴ樹冠内における相対照度、相対光合成有効光量子束および相対日射量の比較. *園学雑*. 68: 297-301.
- 浅田式典. 1989. リンゴ園における葉面積の推定法. *園学雑*. 58: 25-29.
- Barlow, H. W. B. 1980. The relationships between leaf size and shoot length in apple. *J. Hortic. Sci.* 55: 279-283.

- Barritt, B. H. , C. R. Rom, B. J. Konishi and M. A. Dilley. 1991. Light level influences spur quality and canopy development and light interception influence fruit production in apple. *HortScience*. 26: 993-999.
- Boyton, D. and R. W. Harris. 1950. Relationships between leaf dimension, leaf area, and shoot length in the McIntosh apple, Elberta peach, and italian prune. *Amer. Soc. Hort. Sci.* 55: 16-20.
- Charles-Edwards, D. A. and M. R. Thorpe. 1976. Interception of diffuse and direct-beam radiation by a hedgerow apple orchard. *Ann. Bot.* 40: 603-613.
- 中央果実協会. 2018. 平成29年度省力樹形等新たな果樹生産技術調査報告書. 中央果実協会調査資料. 246: 1-99.
- Emerson, F. H. and R. A. Haydea. 1975. High density "Tree Walls". *HortScience*. 10: 550.
- 文室政彦・村田隆一. 1987. 低樹高密植カキ園の整枝法. 第2報. 整枝法による葉量と光透過及び枝梢の成長の差異. 滋賀県農業試験場研究報告. 28: 78-84.
- Heinicke, D. R. 1963. The microclimate of fruit trees.II. Foliage and light distribution patterns in apple trees. *Amer. Soc. Hort. Sci.* 83: 1-11.
- Heinicke, D. R. 1966. Characteristics of McIntosh and Red Delicious apples as influenced by exposure to sunlight during the growing season. *Amer. Soc. Hort. Sci.* 89: 10-13.
- 平野 暁. 1989. 第5章. 栽植密度. p. 156-201. 平野 暁・菊池卓郎編著. 果樹の物質生産と収量. 農文協. 東京.
- Horie, T. and T. Udagawa. 1971. Canopy photosynthesis of sunflower plants. Its measurements and modeling. *Bull. Nat. Inst. Agr. Ser.* A18: 1-56.
- 猪俣雄司・和田雅人・小野剛史・鈴木邦彦・増田哲男. 1998. M. 9EMLA台木リンゴ樹の乾物生産とその分配の品種間差異. *園学雑*. 67: 744-752.
- 伊藤大雄. 1995. 桑個体群の受光態勢と光合成に関する生産生態学的研究. *蚕糸昆虫究報*. 13: 1-142.
- 伊藤大雄. 2018. 平棚で栽培したマルバカイドウ台木リンゴ樹における果実収量と果実品質の経年変化. *園学研*. 17: 191-197.
- Jackson, J. E. and J. W. Palmer. 1972. Interception of

- light by model hedgerow orchards in relation to latitude, time of year and hedgerow configuration and orientation. *J. appl. Ecol.* 9: 341-357.
- Jackson, J. E. 1988. World-wide development of high density planting in research and practice 1989. *Acta Horticulturae*. 243: 17-27.
- Johnson, R. S. and A. N. Lakso. 1985. Relationships between stem length, leaf area, stem weight, and accumulated growing degree-day in apple shoots. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 110: 586-590.
- 神戸和猛登・小野寺 勇. 1992. リンゴわい性樹‘ふじ’の樹冠内光環境の時期別変化と受光量が果実品質に及ぼす影響. *園学雑*. 61 (別1) : 98-99.
- Kikuchi, T. , Y. Shiozaki, T. Asada and O. Arakawa. 1994. Light and fruit distributions within a canopy of ‘Fuji’ apple trees trained to a traditional open-center system in Japan. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 62: 761-768.
- 岸本 修・清家金嗣. 1972. 日本ナシの整枝法の変更に伴う果実生産要因の推移. *園学雑*. 41: 331-338.
- 倉橋孝夫・高橋国昭. 1995. Y字形棚整枝と主幹形整枝リンゴ樹‘ふじ’の光環境と果実品質および光合成特性の比較. *園学雑*. 64: 499-508.
- 黒田治之・西山保直・千葉和彦. 1996. わい性および半わい性台木利用リンゴ樹における栽植密度と生長の関係. *園学雑*. 65: 227-236.
- 黒田治之・千葉和彦. 2002. M.26わい性台木利用リンゴ樹における生産構造と光環境に及ぼす栽植密度の影響. *園学雑*. 71: 544-552.
- 黒岩澄雄・門司正三. 1963. 植物群落における光要因と光合成の理論的解析 (1) —葉群構造と直射光, 散光および自然光との関係—. *農業気象*. 18: 143-151.
- 黒岩澄雄. 1968. 植物群落における光要因と光合成の理論的解析 (3) —散光下光合成と比較しての, 平行光線下葉群光合成—. *農業気象*. 24: 75-90.
- Lakso, A. N. and R. C. Musselman. 1976. Effects of cloudiness on interior diffuse light in apple trees. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 101: 642-644.
- 松井弘之. 1989. 第2章 光合成産物の生産と分配. p. 25-81. 平野 暁・菊池卓郎編著. 果樹の物質生産と収量. 農文協. 東京.
- Monsi, M. and T. Saeki. 1953. Über den Lichtfactor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduction. *Jap. J. Bot.* 14: 22-52.
- Monteith, J. L. 1965. Light distribution and photosynthesis in field crops. *Ann. Bot.* 29: 17-37.
- 森岡節夫. 1978. 剪定と光利用. p. 87-90. 果樹の栽培新技術編集委員会編. 果樹の栽培新技術博友社. 東京.
- Oikawa, T. 1977. Light regime in relation to plant population geometry. I. A monte Carlo simulation of light microclimates within a random distribution foliage. *Bot. Mag. Tokyo.* 90: 1-10.
- 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.
- Pearce, R. B. , B. H. Brown and R. E. Blaser. 1967. Photosynthesis in plant communities as influenced by leaf angles. *Crop. Sci.* 7: 321-324.
- Shinozaki, K. and T. Kira. 1956. Intraspecific competition among higher plants. VII. Logistic theory of the C-D effect. *J. Inst. Polytech. Osaka City Univ. Ser. D.* 7: 35-72.
- Smart, R. E. 1973. Sunlight interception by vineyards. *Amer. J. Enol. Viticult.* 24: 141-147.
- 鈴木鉄男. 1964. 果樹葉面積の概算法に関する検討. 第1報. 落葉果樹における葉長葉幅法の適用. *農及園*. 39: 1585-1586.
- 橘 温・森岡節夫・中井慈郎. 1987. ウンシュウミカンの栽植密度と栽培条件が収量に及ぼす影響. *園学雑*. 56: 9-15.
- 橘 温・中井慈郎. 1989. 異なった栽植密度におけるワセウンシュウの樹冠密度と枝量及び葉面積指数との関係. *園学雑*. 58: 91-96.
- 高橋国昭. 1985. ブドウ‘デラウェア’の最適葉面積指数について. *園学雑*. 54: 293-300.
- 田中孝幸. 1972. 水稻の光—同化曲線に関する作物学的研究-特に受光態勢制御との関係—. *農技研報*. A19: 1-87.
- 山本隆儀・山口恵理. 1989. 果樹の樹形、葉群構造の簡易解析システム—二側面写真画像を用いた新システムの開発—. *山形大学紀要 (農学)*. 10: 869-901.
- 山本隆儀・上田仁悦・小泉弘樹・西沢滝太. 1990. 落葉果樹の樹冠内放射の減衰係数とその推定パラメータ. *山形大学紀要 (農学)*. 11: 155-176.

- 山本隆儀・畠 良七. 1991. 果樹の樹形・葉群構造の季節的变化推定システム. 山形大学紀要（農学）. 11: 343-373.
- 山本隆儀・石橋幸夫・鈴木計恵子. 1992. 同一樹齢のカキ‘平核無’樹の葉群構造、日当たり及び果実生産性の同一園地内分布及びこれらに関する諸形質の相互関係. 山形大学紀要（農学）. 11: 501-521.
- 山本隆儀・佐藤吉雄・舟生卓磨・石橋幸夫・鈴木計恵子. 1993. カキ‘平核無’樹の推定純光合成速度および果実生産性との関係. 園学雑. 62: 27-39.
- 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: 155-166.
- 山本隆儀・伊藤博祐. 1996. 広角レンズを用いた直角2側面写真による密植わい性リンゴ樹の樹形、葉群構造の計測. 園学雑. 64: 729-739.
- 山本隆儀. 1998. はほぼ同一の葉量、容積および占有土地面積を有する独立樹の樹冠内光環境に及ぼす樹冠形と葉群構造の影響に関するコンピュータ解析. 山形大学紀要（農学）. 13: 13-27.
- 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: 89-116.
- 山本隆儀・佐藤嘉一. 2001. 葉温と気象要因を用いた数種落葉果樹の葉面の光合成有効光量子束（葉面PPF）のリモートセンシング. 園学雑. 70（別1）: 198.
- 山本隆儀・宮田裕美・野口マキ・奥山定治. 2004. 樹冠情報長期予測を目的に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: 59-93.
- 山本隆儀・奥山紳哉. 2004. 果樹の乱雑な葉層内における派生散乱光由来の光合成有効放射束密度とその簡易測定法. 農業気象. 60: 299-306.
- Yamamoto, T., K. Miyamoto and Y. Satoh. 2005. Rapid and simultaneous approximations of photosynthetic photon flux density and net photosynthetic rate in a cherry tree canopy by thermal imaging. J. Japan. Soc. Hort. Sci. 74: 101-108.
- 山本隆儀・野口マキ・松林美樹・菊池雄一郎・草村 誠・今野拓道・谷澤佳美. 2007. 樹形構築解析システム（CACOAS）に用いる数種落葉果樹のパラメータ類の収集とその精度の検討. 山形大学紀要（農学）. 15: 69-104.
- 山本隆儀・麻生桃代・西沢滝太・庄司紀之・佐藤健吾・小山智江・上野恵里・須田 慶. 2009. 数種落葉果樹の葉面傾斜角度分布に関する研究. 山形大学紀要（農学）. 15: 43-272.
- 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: 51-84.
- 山本隆儀. 2015. 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—. 山形大学紀要（農学）. 17: 153-185.
- 山本隆儀. 2016. 樹冠内葉層分布形の3次元構造と果樹園光環境の関係—モデル手法を用いた解析例—. 山形大学紀要（農学）. 17: 227-259.
- 山本隆儀. 2017. 葉量を変えない条件下の樹冠の部分的変形が果樹園光環境に及ぼす影響—モデル手法を用いた解析例—. 山形大学紀要（農学）. 17: 333-363.
- 山本隆儀. 2018. 樹冠形の違いおよび樹冠形の部分的変形処理が果樹園光合成に及ぼす影響—モデル手法と純光合成速度推定式を用いた解析例—. 山形大学紀要（農学）. 18: 31-53.
- 山本隆儀. 2020. 果樹の整枝せん定における選択枝と樹冠設計システム（CDS）を用いた多様な樹冠モデルの作成. 山形大学紀要（農学）. 18: 157-189.
- 山本隆儀. 2021. 立木仕立て果樹における整枝せん定の選択枝が果樹園の光環境に及ぼす影響—モデル手法を用いた解析—. 山形大学紀要（農学）. 18: 287-320.
- 山本隆儀. 2022. 園地当たりの葉量が等しい条件下における樹幅と樹高の違いが果樹園の光環境に及ぼす影響—樹冠設計システム（CDS）を用いたモデル実験—. 山形大学紀要（農学）. 19: 1-25.
- 吉田 亮・村尾和博・池田隆政・村田謙司・井上耕介. 2006. ニホンナシ‘ゴールド二十世紀’の間伐樹に対する幼木期の整枝法の違いが乾物生産と器官別の分配に及ぼす影響. 園学研. 5: 289-296.