

樹冠内葉層分布の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 本 隆 儀

山形大学名誉教授

(平成27年9月11日受付・平成27年11月10日受理)

Relationships between 3-Dimensional Structures of Foliage Distribution in
Canopies and Light Environments in Orchards :
Analytical Results Using Model Methods

Takanori YAMAMOTO

Professor Emeritus, Yamagata University, Tsuruoka 997-8555, Japan

(Received September 11, 2015 • Accepted November 10, 2015)

山形大学紀要（農学）第17巻 第3号 別刷（平成28年）
Reprinted from Bulletin of Yamagata University
(*Agricultural Science*) Vol. 17 No.3 (2016)

樹冠内葉層分布の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 本 隆 儀

山形大学名誉教授

(平成27年9月11日受付・平成27年11月10日受理)

Relationships between 3-Dimensional Structures of Foliage Distribution in Canopies and Light Environments in Orchards : Analytical Results Using Model Methods

Takanori YAMAMOTO

Professor Emeritus, Yamagata University, Tsuruoka 997-8555, Japan

(Received September 11, 2015 • Accepted November 10, 2015)

Summary

The present study was designed to find factor which improves orchard light environment. Using a new technique, diversiform canopy models of 528 sum total were constructed which were divided into 29 types of canopies as prototypes. For each canopy, simulation experiment of orchard light environment of apple 'Fuji' in the end of July was carried out using OLEAS (Yamamoto, 1999). In comparison with the previous report (Yamamoto, 2015), a large degree of freedom in the canopy shape was shown. The maximum value of the daily mean leaf PPFD on a clear day (CDMPPFD) became larger than the previous report and the fluctuating range was wider. The maximum value of that on an overcast day (ODMPPFD) also became larger. The light environment of the north and south combination type, the trellis type and the regularly-interval scattering type were excellent among the 29 types. The mean CDMPPFD of the CACOAS origin type was the smallest. The orders of light environment were thought to be close for the 3-dimensional structures of foliage distributions in the canopies notwithstanding the same quantity of leaves per canopy. In the 528 canopies, high correlations were recognized between the CDMPPFDs or the ODMPPFDs and the several characteristics of canopy shape. The orders of the light environments found in the experiments were almost established in another case when distribution of leaf density, level of leaf density, grid size or fruit tree species was changed, respectively.

Key words : apple 'Fuji', characteristics of canopy shape, external form of canopy, randomness in scattering of foliage, simulation

緒 言

果実はビタミン、ミネラルなどの必須栄養成分のみならず機能的成分の供給源としても重要な食品である。しかし、我が国の国民一人当たり果実消費量は、欧州、北米、中東諸国などに比べて1/2から1/3程度という実態である (FAO, 2000)。健康志向やバランスの取れた食文化の視点から、果実年間消費量を欧米なみに引き上

げるには、現在の2倍から3倍の果実供給量が必要だ。この場合、輸入より自給による方が自国産業として健全であり、食品の安全性の点で望ましい。果樹の増殖とともに、高品質多収果実の安定的生産という目標のうち、多収の重要性を忘れてはならない。

高品質多収果実の安定的生産にとって、葉量を確保し、なおかつ、樹冠内光環境を良好に保つことが極めて重要である。果樹の光合成を積極的に高める栽培管理方

キーワード：樹冠外形、樹冠形状値、リンゴ 'ふじ'、シミュレーション、葉層散在の乱雑さ

法が極めて乏しい（Barden・Ferree, 1979; Ferree, 1978; Gergely・Erdélyi, 1985）状況では、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。しかし、既報（山本, 2014）でも詳しく紹介したように、この方面における実際の果樹を用いた調査研究においては、光環境の実測や材料準備などの点で大きな困難を伴い、条件を揃えた横並びの比較試験結果は皆無に近い。一方、モデル手法を用いた研究例として、木製円錐体を並べた物理モデル（Ferguson, 1960）およびヘッジロー外形を幾何学的図形に単純化した数学モデルを用いた研究（Palmer, 1977; Charles - Edward・Thorpe, 1976）が存在するが、樹冠形に関する極度の単純化がなされ、樹冠内部構造は全く考慮されていない。よって、厳密な試験や関連するデータが無く、受光態勢の改善と言っても栽培者の感覚的な工夫に留まっているのが実状である。

本研究目的は果樹園の光環境改善をもたらす樹冠内葉層分布の3次元構造を見出し、受光態勢の改善に役立てることである。この目的に沿って、筆者は果樹の樹形構築解析システム（山本ら, 2004, 以下, CACOAS）を用いて作成した多数の樹形群を対象に、果樹園光環境解析システム（山本, 1999, 以下, OLEAS）を用いたシミュレーション実験を行い、果樹園光環境を比較調査し、幾つかの重要な知見を得てきた（山本, 2014; 山本, 2015）。ただし、CACOASを用いて作られた樹冠は、慣行的、伝統的な剪定方法に基づき配置された新梢の空間的分布に依存したため、葉層分布の自由度は総じて小さいものと判断された（山本, 2015）。そこで本報では、CACOASにとどまらず、樹冠葉層の外部形態と内部構造を人為的に与える独自の手法を用いて、多種多様な樹冠モデルを作り出すとともに、OLEASを用いて光環境を比較調査し、樹冠内葉層分布の3次元構造における受光態勢の改善要因を見出そうとした。具体的には、リンゴ‘ふじ’について1樹当たり割り当て空間内の葉量を等しくする条件で、合計528個の樹冠モデルを作成した。これらを等しい栽植距離で配植してできる仮想果樹園を対象に、OLEASによるシミュレーション実験を行い、果樹園光環境と樹冠内葉層分布の3次元構造の関係を様々な角度から解析した。加えて、実験で得られた光環境良否の序列関係が、葉密度分布、葉密度レベル、グリッドサイズおよび樹種・品種を変えた場合にも成立するかについても検討したものである。なお、この種の試験がモデル手法に頼らざるを得ないことについては既報（山本, 2014）に詳しく記

した通りである。

なお、上述のCACOASとOLEASに関する掲載論文がいずれも長文であったため、本報中で詳しく解説できないことを断っておきたい。そこで、読者が理解するための、せめての一助となるべく、極めて簡単ではあるが、以下に概要だけを記しておくが、詳細については上記掲載論文を是非参照されたい。

CACOASは果樹の新梢の発生習性や生長、葉の着生などに関する推定パラメータ（主に重回帰推定用）、骨格枝の配置と剪定方法の選択肢、葉量の年次別目標や1樹割り当て空間などの制約条件を用いながら、枝の空間配置と葉着生の年次推定、毎年剪定処理などを行う。また、各年の関連データを全て記憶蓄積しながら、これらを翌年の推定に役立てる。また、樹形や樹冠形の作図、葉量の空間分布データ（3次元グリッドの各ブロック内葉量データ）、葉ブロック群のソリッドモデル図（以下、積木構造図）などを毎年出力する。

OLEASは3次元仮想グリッド内ブロックと様々な傾きを有する斜方柱とを交錯させ、斜方柱内の光減衰を解析するもので、周辺樹による光吸収の影響も含め、最終的にブロック内の個々の葉の葉面受光強度を推定時刻ごと算出する。主たる入力データやパラメータには推定地の投射光強度（直射光と天空光）、推定地の緯度や推定時期の太陽高度と方位、使用果樹品種に特有な様々な光減衰係数の推定用パラメータ群、葉の傾斜角度分布、個葉面積、樹間距離、樹列間距離などがある。

材料および方法

1. 多数の樹冠モデルを用いた光環境比較研究における実験設定

多数の樹冠モデルを用いて果樹園光環境を比較する際に遵守すべき以下の諸条件（山本, 2014）に従った。すなわち、①等しい大きさの割り当て空間（樹高制限約3.5m、樹冠底部制限高約0.6m、東西樹幅制限4mおよび南北樹幅制限4m）、②等しい葉量、③樹列方向は南北方向、④樹間距離4mおよび樹列間距離6mの栽植距離、⑤同一時期同一天候（鶴岡市の7月下旬の典型的な晴天日と曇天日の投射光データの使用）の諸条件であった。

用いたグリッドは4m×4m×4mの立方体で、1辺を21分割したので、ブロック1辺長は約19.047cmになった。OLEASはブロック1辺長の刻みで長さを扱うため、

樹高制限は18ブロック高（ $\approx 3.428\text{m}$ ）、樹冠底部制限高は3ブロック高（ $\approx 0.571\text{m}$ ）であった。また、割り当て空間をブロック数で示すと6615（ $=21 \times 21 \times 15$ ）個となった。このときの割り当て空間内の葉量には、樹齢15年における妥当と考えられる園地LAI（ LAI_0 、山本、2014）を僅かに上回る数値（本実験では $\text{LAI}_0 = 1.186$ ）に相当する葉量を用いた。

割り当て空間に相当する合計6615個のブロックのうち、一部に葉を存在させ、これを葉ブロックとした。7月下旬のリンゴ‘ふじ’の葉ブロック内葉密度の平均値（ 0.06295cm^{-1} 、ブロック内葉数15.28枚に相当。山本、2015）から、上記 LAI_0 を実現するための葉ブロック総数を求めたところ、葉ブロック総数は約656個に相当した。よって、本実験では割り当て空間に656個の葉ブロックを配置した。

果樹園光環境の主要な指標として、既報（山本、2014；山本、2015）と同様、1日における樹冠内全葉の葉面PPFD平均値を用い、晴天日ではCDMPPFDの略号、曇天日ではODMPPFDの略号を用いた。いずれも単位は $\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ であった。CDMPPFDやODMPPFDにより平均受光量を比較できても、樹冠内光環境の均一性、いわゆる‘明るさのむら’の程度を比較できない。このための指標には葉面PPFDの変動係数（CV）が適している。ただし、本報では1日を通じての変動係数を算出する代わりに、葉面PPFDの毎時分布における変動係数の13時刻（6時～18時の各時刻）の平均値（以下、平均変動係数、DMCV）を新たに用いた。晴天日および曇天日の平均変動係数の略号に、それぞれ、CDMCVおよびODMCVを用いた。単位は%で、数値が小さいほど光環境の均一性が高いことを示す。

2. 樹冠モデルの構築方法とその形状による類型化

近年、種々の目的からキャノピーアーキテクチャの研究が始められ、たとえば、Prusinkiewics（1998）による自然植物形の時空シミュレーションモデル（L-system）、樹木アーキテクチャ（Kawamura・Takeda, 2004）、CACOASなどが認められる。一方、実測が著しく困難な植被内光環境の推定方法を大別すると、個々の茎葉と様々な光線との交わりを数多く計算するモンテカルロシミュレーション法（Oikawa, 1977；伊藤, 1995）およびOLEASが認められる。特に、1樹当たり葉数が数千枚から数万枚にも及ぶ果樹を対象にすると、OLEASが用

いる仮想グリッドは極めて便利であると考えられる。本研究のように、キャノピーアーキテクチャと植被内光環境を関連づける場合、両者に共通なデータ構造が求められる。幸いのことに、CACOASとOLEASにはグリッドを構成するブロック内の葉量データという共通データが存在する。加えて、CACOAS由来のデータにとどまらず、最初から葉ブロックの分布を自由に作成できる。自然植生、林木、大型耕種作物と異なり、毎年大量の枝を剪除する栽培果樹においては、同一果樹といえども仕立て方法や剪定方法の違いにより樹冠形に多種多様な変異が生まれやすく、極めて人工的色彩の強い樹冠形と見なされる。よって、葉ブロック分布を自由に作成でき、かつ、OLEASにより光環境を比較できることは、本研究にとって極めて好都合である。

上記のことから、CACOASによらない独自の樹冠モデル構築方法を検討した。すなわち、樹形から出発せず、グリッド内ブロックの一部を葉ブロックに置き換える手法である。

この置き換え方の一つとして機械的組み合わせの方法がある。すなわち、上記割り当て空間内6615個のブロックを要素とする三次元配列のうち、656個のブロックを葉ブロックとする全ての組み合わせを作り出す手法である。この手法により全ての組み合わせが実現し、組み合わせ漏れが無い。ただし、組み合わせ総数は ${}_{6615}C_{656}$ となり、10の約927乗という天文学的数に達する。また、僅か1個の葉ブロックの位置が異なっても別の組み合わせになるものの、光環境自体はほとんど変わらないと見なすべきで、無駄なシミュレーション実験回数も天文学的数に達する。また、これらの計算を仮にやり終えたとしても、各組み合わせの記述は要素数6615個の3次元配列変数を用いて表現するため、個々の形容記述が大変難しく、相互の形態的区別は容易でない。

機械的組み合わせの方法に代わり、本報では馴染みやすい形状を扱う手法を用いた。すなわち、外形や葉層分布の3次元構造の形容・識別が容易な立体形を数多く取り上げ、これらの立体内部に所定の数の葉ブロックを配置した。以下、この手法で作られた立体形を樹冠原形（canopy shape as prototype）と呼ぶことにする。自然原野の樹木、庭園木、栽培果樹などを広く観察した結果、現時点で考えられる樹冠原形を、棚状、回転体状、非回転体状、輪状、らせん状、分離状、不定形状などに大別した。さらに、葉ブロック集合体を葉ブロックが連続す

るもの（以下、連続体）と散在するもの（以下、散在体）に大別し、この連続体と散在体の違いをも組み合わせ、合計29個の樹冠原形の類型（type）を設けた。

各類型の説明に入る前に、関連する用語、命名法などを統一しておきたい。幾何学的に定義される滑らかな立体形とは異なり、上述の樹冠原形はこれを立方体グリッドに閉じ込めてできる葉ブロックの積木構造に変えたものである。次に、樹冠原形の葉ブロック数を所定の数に調整したものを樹冠形（canopy shape）と呼ぶことにする。さらに、連続体に用いた断面形を葉層断面形（cross section of foliage, CSF）、散在体を構成する葉層の単位を単位葉層（unit foliage, UF）とした。樹冠原形の類型記号として大文字のアルファベット1文字、これに続いて、同一類型内の個々の樹冠形を区別するための2桁の数字（樹冠形番号）、および最後部に葉ブロック数調節処理方法を区別するための小文字のアルファベット1文字を用いた。つまり、個々の樹冠形を識別するのに合計4字を用いた。ただし、これらは識別だけのものであり、文字や数字の順序には何の意味を有していないことを断っておきたい。文字や数字の順序に一貫性を欠いたのは、個々のプログラム作成の順番、試行錯誤、分量制限などの理由があったためである。

第1図は各類型における葉ブロック数調整処理前の積木構造図それぞれ1例ずつを示した。類型記号（A～Z）とともに、括弧内に具体例の識別記号（類型記号+樹冠形番号）の3字のみを記した。

連続体については、葉ブロック1個の厚さで面状に連続するもの、球や楕円柱のような回転体や非回転体、および、形と大きさが特有な葉層断面形を輪状あるいはらせん状に連続させてできるものに類型化した。順に、棚状連続体（類型記号はA、以下も同様）、単純な回転体（B）、単純な非回転体（C）、輪状連続体（G）およびらせん状連続体（E）の類型名（記号）を用いた。ここで、輪状連続体は後述の葉層断面形を回転することで輪状に形成される連続体であった。また、らせん状連続体は葉層断面形を回転するとき一定のピッチで回転軸（垂直軸）に沿って上方に移動することで、結果的にらせん状に形成される連続体であった。

散在体については後述の単位葉層の形状および散在の仕方により幾つかに類型化した。すなわち、同じ形、大きさおよび傾きを有した単位葉層の輪状散在体（H）あるいはらせん状散在体（Z）、同じ大きさの単位葉層がそ

の傾きを乱雑に変えた輪状散在体（S）あるいはらせん状散在体（T）、同じ傾きの単位葉層がその大きさを乱雑に変えた輪状散在体（V）あるいはらせん状散在体（W）、単位葉層の傾きと大きさの両者を乱雑に変えた輪状散在体（X）あるいはらせん状散在体（Y）、樹冠中心部からの単位葉層の放射状散在体（P）、樹冠底部からの単位葉層の放射状散在体（N）および大きい単位葉層の少数分離散在体（O）に類型化した。なお、葉層断面形や単位葉層には数種類を用意した（第2図および第3図）。

輪状散在体の場合、単位葉層を最初に配置する方を西に設定し、回転方向は上を見ながら時計針方向とし、回転角度間隔については72度、90度および120度の3種類とした。ただし、このままだと単位葉層が上下の段とも同じ方向に配置され、散在体としては極端な形状になった。そこで、上記の輪状散在体（H、S、VおよびX）においては、出発点の配置方向を段ごとと少しずらした。なお、輪状散在体（H）と同じながら配置方向を段ごととずらさない輪状散在体（Q）も作成した。

らせん状散在体の場合、単位葉層を最初に配置する方を西に設定し、周回方向は上を見ながら時計針方向とし、周回における角度間隔を90度、120度および144度の3種類とした。輪状散在体の場合と同様に、このままだと単位葉層が上下の周とも同じ方向に配置され、上下に重なりやすいため、上記のらせん状散在体（Z、T、WおよびY）においては、出発点の配置方向を周ごとと少しずらした。なお、らせん状散在体（Z）と同じながら出発点の配置方向を周ごととずらさないらせん状散在体（F）も作成した。

上述の単位葉層の大きさを乱雑に変える処理は以下のようにした。すなわち、ほぼ相似形で大中小3段階の大きさの単位葉層を準備したうえで、個々の配置処理ごと乱雑を発生し、乱数値により3者から選択させた。ほぼ相似形としたのは、積木構造のため厳密な相似関係が成立しなかったためである。また、乱雑に変える処理は以下のようにした。すなわち、配置処理を施すたびに、2回乱雑を発生させた。1回目の乱数値により正負の符号を決め、2回目の乱数値×30度の計算値に正負の符号を付け、これにHやZに用いた当初設定傾斜角度を加えることで傾斜角度を決定した。単位葉層の傾きと大きさの両者を乱雑に変えるには、上記2つの手法を同時に用いた。

放射状散在体（PあるいはN）は輪状散在体と似ていたが、単位葉層の内側先端部が樹冠中心部あるいは樹冠

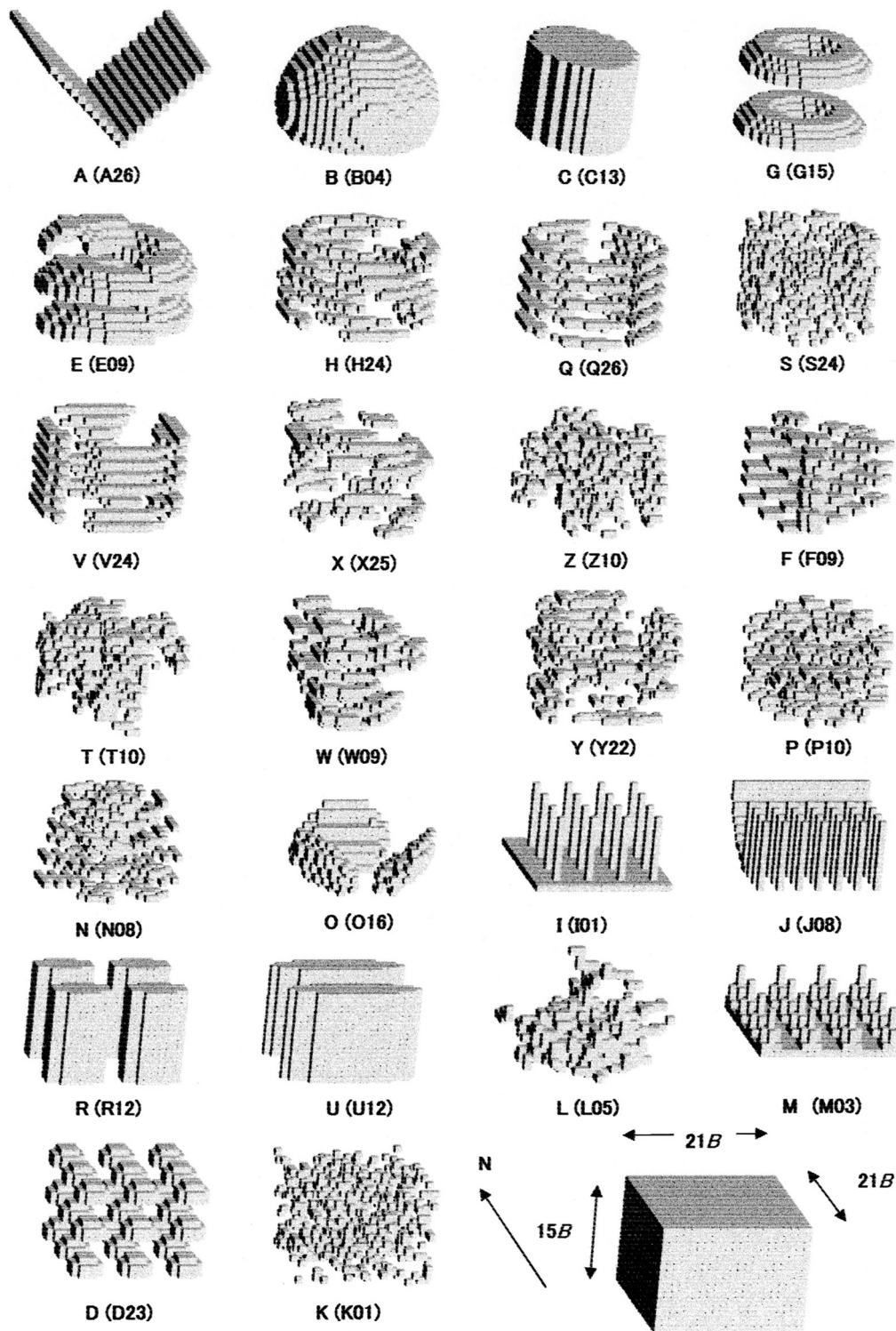


Fig. 1 One example of solid model of canopy shape as prototype per type. The alphabets and the numerals indicate the type and the kind of canopy shape, respectively. The view angle and the set space were shown at a lower part in the right.

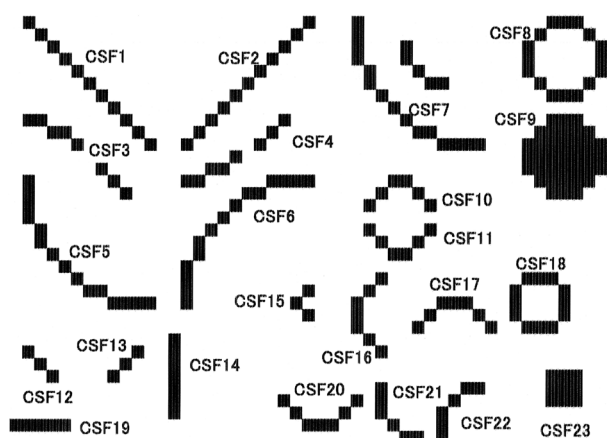


Fig. 2 Cross sections of foliage (CSFs).

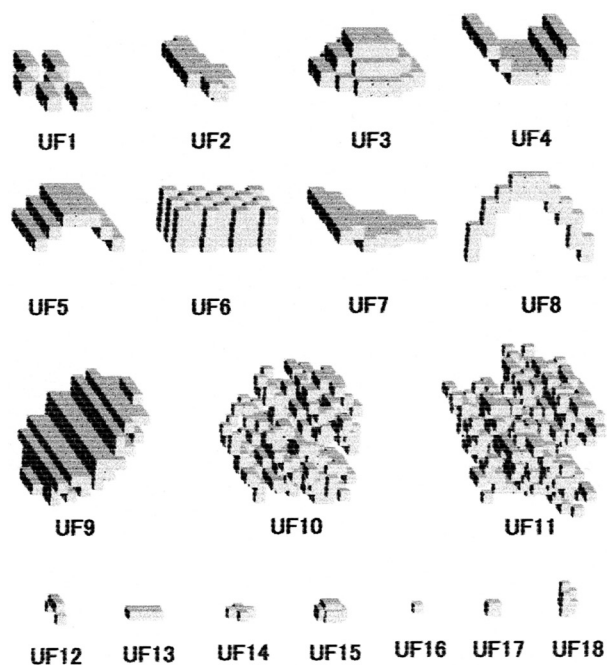


Fig. 3 Unit foliage (UFs) as solid models.

底部を絶えず向くため、結果的に放射状になった。したがって、傾きがその垂直位置により調整された点が上記の輪状散在体とは異なった。

上記の類型においては、単位葉層そのものは小さかったため、数も多く、単位葉層どうしが近接しながら散在した。しかし、1つの樹冠が2個、3個、4個あるいは5個といった少数の単位葉層で構成される場合、単位葉層そのものは大きくなり、分離した状態で散在する。そこで、散在体の最後に、大型単位葉層の小数分離散在体(O)の類型を設けた。

上記類型のほかに、複数の樹冠原形を組み合わせたも

のとして、異なる樹冠原形の上下組み合わせ(I)および異なる樹冠原形の南北組み合わせ(J)の類型を設けた。ただし、組み合わせが無理なもの、あるいは、組み合わせによって当初の樹冠原形イメージが大きく損なわれるものについては除外した。

近年、細形あるいは薄形の樹を密に並べて栽植する方式も現れていることから、これらの光環境を比較することの意義は大きい。この場合、割り当て空間内に細形の樹冠を4個、あるいは樹列方向に細長い扁平の樹冠を2個配置し、これを1つの樹冠原形と見なせば、本研究の比較実験における共通条件を満たす。そこで、細形立体4個からなる樹冠原形の類型(R)および扁平立体2個からなる樹冠原形の類型(U)を設けた。

さらに、CACOASを用いて構築した樹形(山本, 2015)を素材として用いることで、CACOAS起源の樹冠原形の類型(L)を設けた。既報における5種類の仕立て方法のうち(山本, 2015)、細形主幹形とトレリス誘引については割り当て空間の大きさが本実験設定と異なったため(山本, 2015)、実験対象から除外した。残りの開心形、変則主幹形およびY字形の3種類に絞り、既報(山本, 2015)の実験データから各5樹を無作為に選んだ。ただし、既報の実験では、葉ブロック数および葉ブロック内葉密度については本研究の共通条件を満たさなかったため、これを満たすように補正したものである。

上記の類型のいずれにも属さなかったが、イメージとして分かりやすいものを幾つか取り上げ、その他の特殊な樹冠原形の類型(M)とした。

最後に、外形がはっきりしない樹冠原形の類型を2つ設けた。等間隔散在体(D)は小さい単位葉層を割り当て空間内に等間隔になるように散在させたものであり、無作為的散在体(K)は小さい単位葉層の割り当て空間内における位置を乱数で無作為的に決めたものであった。

3. 各樹冠形の構築方法

個々の樹冠形の構築方法を記す前に、構築上の共通用語やパラメータなどを説明したい。樹冠形構築には、樹冠全体の寸法(樹冠サイズ)のほかに、単位葉層の形状、葉層断面形、傾斜角度、配置方角、回転角度間隔、周回角度間隔、段数、周回数などの様々なパラメータを必要とした。この構築は葉ブロック(立方体)の積木作業に等しいので、樹冠サイズやパラメータにおける長さの単位としてブロック1辺の長さ(以下、B)を用いる

のが分かりやすい。本研究では、割り当て空間の有効利用の観点から、各樹冠形特有の形状を保持しながらも割り当て空間いっぱい広がる樹冠サイズ（第1図右下）、すなわち、南北幅 $=21B$ 、東西幅 $=21B$ 、制限樹高 $=18B$ および制限底部高 $=3B$ を目標とした。たとえば直立円柱の場合、割り当て土地区画に内接する円を用い、これよりも小さい円を用いなかった。葉ブロック集団が円柱内に収まる輪状連続体などの場合についても上記同様にした。また、割り当て空間の縦幅が横幅より短かったので、たとえば球全体を使用できず、その頂部は割り当て空間に内接しても、基部がはみ出し、結果的に球台となった（第1図B）。回転体や非回転体の多くで、基部あるいは頂部をカットした形状（台状）になったことを断っておきたい。目標値としたのは、樹冠形の種類によっては目標値通りにはいかないケースがあったためである。たとえば、水平棚の樹高はあまり高くできないし、楕円や長方形などでは2方向の横幅が不均等になり、高さもまちまちになったためである。水平棚の高さには $11B$ （約2m）を用い、矩形の長辺と短辺の長の比には原則として7:5を用い、楕円の長径と短径の比には原則として10:7を用いた。

棚状連続体(A) 水平面状、衝立状、あるいは水平1方向の高さだけは変えないで、薄い葉層を連続させたとき、その形状は棚状になった（第1図A）。これらを棚状連続体と定義した。このときの葉層断面は通常1ブロックの厚さとした。棚断面形（cross section of trellis, CST, 第4図）が水平線状（樹冠原形の記号はA01、使用棚断面形は第4図CST1、以下も同様）、東から見た場合の右上がり斜線状（A02, CST2）、東から見た場合の2ブロック厚の垂直線状（A03, CST9）、西から見た場合のL字状（A04, CST3）、東から見た場合の双曲線状（A05, CST4）、東から見た場合の飽和曲線状（A06）、東から見た場合のS字状（A07, CST5）、西から見た場合のS字状（A08）、東から見た場合のU字状（A13, CST8）、東から見た場合の逆U字状（A14, CST11）、東から見た場合のV字状（A15, CST6）、東から見た場合の逆V字状（A16）、南から見た場合のサイン曲線状（A17, CST12）、南から見た場合のコサイン曲線状（A18, CST7）、東から見た場合のW字状（A19, CST15）、南から見た場合のU字状（A24）、南から見た場合の逆U字状（A25）、南から見た場合のV字状（A26）、南から見た場合の逆V字状（A27）および南から見た場合のW字状（A28）からなる、合計20種類

の棚状連続体を構築した。このほか、特殊な棚状連続体として、南から見た場合の3連山状（A29, CST13）、東から見た場合の3連山状（A30）、南から見た場合の波線状（A31, CST14）、東から見た場合の波線状（A32）、東から見た場合のT字状（A33, CST16）、南から見た場合のT字状（A34）、東から見た場合のY字状（A35, CST17）、南から見た場合のY字状（A36）、東から見た場合の二本の垂直線状（A38, CST10）および南から見た場合の二本の垂直線状（A39）からなる、合計10種類の棚状連続体を構築した。また、棚状とはいえず、樹列方向は南北方向とし、樹間距離と樹列間距離はそれぞれ4mおよび6mとしたため、樹列間2mの領域には葉層が無かったことを断っておきたい。

単純回転体状連続体(B) 単純回転体状連続体は、滑らかな曲面を有する回転体をグリッドで仕切ってできる積木構造にした連続体である（第1図B）。用いた単純回転体の種類により直立円柱（B01）、東西に横たわった円柱台（B02）、南北に横たわった円柱台（B03）、球台（B04）、円錐（B05）、倒立円錐台（B06）、縦長楕円球台（B07）、横長楕円球（B08）、放物線回転体台（B09）、倒立放物線回転体（B10）、双曲線回転体（B11）、倒立双曲線回転体（B12）、倒立飽和曲線回転体（B13）および飽和曲線回転体（B14）からなる、合計14種類を構築した。

単純非回転体状連続体(C) 単純非回転体状連続体は、単純非回転体をグリッドで仕切って積木構造にした

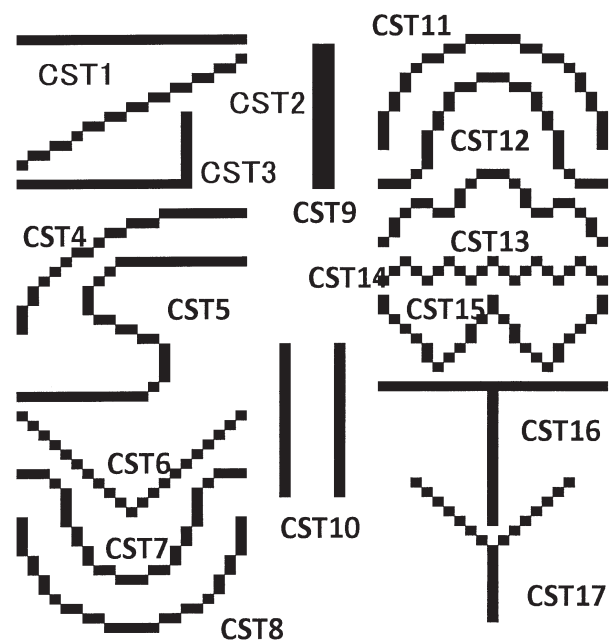


Fig. 4 Cross sections of trellis (CSTs).

連続体である（第1図C）。用いた単純非回転体の種類により直方体（C01）、南北縦長直方体（C03）、直立三角柱（C04）、東西方向横倒し倒立三角柱（C05）、南北方向横倒し倒立三角柱（C06）、東西方向横倒し三角柱（C07）、南北方向横倒し三角柱（C08）、三角錐（C09）、倒立三角錐（C10）、四角錐（C11）、倒立四角錐（C12）、南北方向に長い直立楕円柱（C13）、東西方向に長い直立楕円柱（C14）からなる、合計13種類の単純非回転体状連続体を構築した。

種々の葉層断面形の輪状連続体（G） 複雑な形の葉層断面形を垂直軸の回りに回転してできる輪状の連続体である（第1図G）。西方向に置いた葉層断面形を南から見たときの形状の違い（CSF, 第2図）により、長い右下がり斜線（使用葉層断面形は第2図CSF1, 以下も同様）2段（樹冠原形の記号はG01, 以下も同様）、長い右下がり斜線2段と短い右下がり斜線1段（CSF3）の組み合わせ（G02）、長い右上がり斜線（CSF2）2段（G03）、長い右上がり斜線2段と短い右上がり斜線1段（CSF4）の組み合わせ（G04）、鋸歯線（CSF15）3段（G05）、外側に凸の2分の1円弧（CSF16）2段（G07）、外側下側に凸の4分の1円弧（CSF5）1段（G10）、大きい円環（CSF8）2段（G11）、2種類の大きさの外側下側に凸の4分の1円弧（CSF7）各1段の組み合わせ（G12）、上側に凸の大きい2分の1円弧（CSF17）2段（G15）、短い右下がり斜線（CSF12）3段（G21）、短い右上がり斜線（CSF13）3段（G22）、外側上側に凸の4分の1円弧（CSF6）1段（G23）、下側に凸の2分の1円弧（CSF20）3段（G25）、上側に凸の小さい2分の1円弧（CSF10）3段（G26）、垂直矩形（CSF14）3段（G27）、水平矩形（CSF19）3段（G28）、円（CSF9）2段（G29）および小さい円環（CSF18）2段（G30）からなる、合計19種類の輪状連続体を構築した。一般に段数が多ければ、葉層断面形自体は小さくなるように設定した。

種々の葉層断面形のらせん状連続体（E） 複雑な形の葉層断面形（第2図）を垂直軸中心にらせん状に周回してできる連続体である（第1図E）。Gと同様に、西方向に置いた葉層断面形を南から見たときの形の違い（CSF, 第2図）により、大きい円（CSF9）1周（E01）、外側下側に凸の4分の1の円弧（CSF5）1周（E02）、小さい円（CSF23）の2周（E03）、大きい円環（CSF8）の1周（E04）、外側上側に凸の4分の1円弧（CSF6）の1周（E05）、小さい円環（CSF18）の2周（E06）、上側に凸

の2分の1円弧（CSF17）の1周（E07）、上側に凸の小さい2分の1円弧（CSF10）の2周（E09）、垂直矩形（CSF14）の2周（E10）、水平矩形（CSF19）の2周（E11）、長い右下がり斜線（CSF1）の2周（E12）、外側下側に凸の小さい4分の1円弧（CSF21）の2周（E13）、外側上側に凸の小さい4分の1円弧（CSF22）の2周（E14）、下側に凸の小さい2分の1円弧（CSF11）の2周（E15）、上側に凸の小さい2分の1円弧（CSF10）の2周（E16）、長い右上がり斜線（CSF2）の2周（E17）、上側に凸の2分の1円弧（CSF17）の2周（E18）、短い右下がり斜線（CSF12）の3周（E20）、短い右上がり斜線（CSF13）の3周（E21）および鋸歯線（CSF15）の3周（E22）からなる、合計20種類のらせん状連続体を構築した。一般に周回数が多ければ、葉層断面形自体は小さくなるように設定した。

種々の単位葉層の輪状散在体（HおよびQ） 単位葉層の輪状散在体（第1図H）は、同一形状、同一傾斜角度の単位葉層（第3図UF）を垂直軸の回りに同じ回転角度間隔（以下、 β ）で配置したものであった。単位葉層自身は絶えず垂直軸（回転軸）を向くように姿勢（方角）を変えた。設定葉ブロック数（656個）にできるだけ近づけるために、単位葉層の大きさおよび段数を調整した。なお、傾いた単位葉層に限り、傾斜角度は10度とした（当初傾斜角度）。また、同じ方角に単位葉層が上下に重なり、結果的に極端な樹冠形になることを避けて、各段における回転出発方角を360度／総段数だけずらした。また、1段目の回転出発方角は絶えず西方角とした。 β には72度、90度および120度の3種類を設け、これらと数種類の単位葉層（第3図）を組み合わせた。なお、以下の文中、単位葉層の形状記述は西方角に配置したものを南から見たときのものである。すなわち、枝分かれした右下がりの斜面状単位葉層（第3図UF1, 以下も同様）を用いた $\beta=90$ 度の散在（H18）、 $\beta=120$ 度の散在（H19）および $\beta=72$ 度の散在（H20）、右下がりの斜め6角形板状単位葉層（UF2）を用いた $\beta=90$ 度の散在（H24）、 $\beta=120$ 度の散在（H25）および $\beta=72$ 度の散在（H26）、上側に凸の半球面状単位葉層（UF3）を用いた $\beta=90$ 度の散在（H33）、 $\beta=120$ 度の散在（H34）および $\beta=72$ 度の散在（H35）、上側に凹の半円柱面状単位葉層（UF4）を用いた $\beta=90$ 度の散在（H42）、 $\beta=120$ 度の散在（H43）および $\beta=72$ 度の散在（H44）、上側に凸の半円柱面状単位葉層（UF5）を用いた $\beta=90$ 度の散在（H45）、 $\beta=120$ 度の散在（H46）および $\beta=72$ 度の散在（H47）、叢

(くさむら) 状単位葉層 (UF6) を用いた $\beta = 90$ 度の散在 (H48), $\beta = 120$ 度の散在 (H49) および $\beta = 72$ 度の散在 (H50), 右下がりの斜め三角形板状単位葉層 (UF7) を用いた $\beta = 90$ 度の散在 (H54), $\beta = 120$ 度の散在 (H55) および $\beta = 72$ 度の散在 (H56) および噴水曲線状単位葉層 (UF8) を用いた $\beta = 90$ 度の散在 (H63), $\beta = 120$ 度の散在 (H64) および $\beta = 72$ 度の散在 (H65) からなる, 合計24種類の輪状散在体を構築した。

上記のように, 輪状散在体 (H) についてはいずれも各段における回転開始方角をずらしたが, これをずらさなかったときの影響を調査するため, 合計24種類の輪状散在体 (Q) を構築した (第1図Q)。QはHに比べて, 各段における回転開始方角だけが異なり, 他の細部パラメータはHと全く同じであったため, 詳しい説明は省略した。この場合の類型記号として, 上記のHをQに変え, 樹冠原形番号 (数字部分) はそのまま残した。

単位葉層の傾きが乱雑な輪状散在体 (S) 種々の単位葉層の輪状散在体 (H) においては, それぞれに用いた単位葉層の傾きは一定であった (当初設定角度)。そこで, 単位葉層を配置するたびに, 2. 記した方法により傾きを乱雑に変化させた輪状散在体を構築した (第1図S)。この傾きを除く他の条件については, 類型Hに用いたものと同等にし, 合計24個の樹冠原形を構築した。この場合の類型記号として, HをSに変え, 樹冠原形番号 (数字部分) はそのまま残した。

単位葉層の大きさが乱雑な輪状散在体 (V) 種々の単位葉層の輪状散在体 (H) においては, それぞれに用いた単位葉層の大きさは一定であった。そこで, 2. 記した方法により単位葉層を配置するたびに, 大きさを乱雑に変化させた輪状散在体を構築した (第1図V)。この大きさを除く他の条件については, 類型Hの各樹冠原形に用いたものと同等にしたまま, 合計24種類の樹冠原形を構築した。この場合, HをVに変え, 樹冠原形番号 (数字部分) はそのまま残した。

単位葉層の傾きと大きさが乱雑な輪状散在体 (X) 2. 記した方法により単位葉層を配置するたびに, 傾きと大きさを乱雑に変化させた輪状散在体を構築した (第1図X)。この傾きと大きさを除く他の条件については, 類型Hに用いたものと同等にしたまま, 合計24種類の樹冠原形を構築した。この場合, HをXに変え, 樹冠原形番号 (数字部分) はそのまま残した。

種々の単位葉層のらせん状散在体 (ZおよびF) 同一形

状, 同一傾斜角度の単位葉層 (第3図) を垂直軸の回りに一定の角度間隔だけ周回するたび配置したものである。この周回に伴い垂直軸に沿って一定のピッチで配置位置を上昇させたことにより, 結果的にらせん状の散在になった (第1図ZおよびF)。輪状散在体 (HおよびQ) における回転角度間隔 (β) とは異なり, 周回における角度間隔 (以下, γ) には, らせん状に4回配置したとき1周し出発点の方角に戻るとき ($\gamma = 90$ 度), 3回配置したとき1周して出発点の方角に戻るとき ($\gamma = 120$ 度) および5回配置したとき2周し, 出発点の方角に戻るとき ($\gamma = 144$ 度) の3ケースを設定した。輪状散在体 (H) と同様に, 単位葉層は絶えず垂直軸 (回転軸) を向くように姿勢 (方角) を変えた。設定葉ブロック数 (656個) にできるだけ近づけるように, 単位葉層の大きさおよび周回数を調整した。さらに, 単位葉層が同じ方角に上下に重なり, 結果的に極端な樹冠形になることを避けて, 各周における周回開始方角を γ の3%だけずらした。また, 単位葉層を最初に配置する方角は絶えず西方角とした。なお, 以下の文中, 単位葉層の形状記述は西方角に配置したものを南から見たときのものである。輪状散在体 (HおよびQ) と全く同じ形状の合計8種類の単位葉層 (第3図) と3種類の γ を組み合わせた。すなわち, 噴水曲線状単位葉層 (第3図UF8, 以下も同様) を用いた $\gamma = 90$ 度の散在 (Z10), $\gamma = 120$ 度の散在 (Z11) および $\beta = 144$ 度の散在 (Z12), 枝分かれした右下がりの斜面状単位葉層 (UF1) を用いた $\gamma = 90$ 度の散在 (Z13), $\gamma = 120$ 度の散在 (Z14) および $\gamma = 144$ 度の散在 (Z15), 右下がりの斜め三角形板状単位葉層 (UF7) を用いた $\gamma = 90$ 度の散在 (Z16), $\gamma = 120$ 度の散在 (Z17) および $\gamma = 144$ 度の散在 (Z18), 右下がりの斜め6角形板状単位葉層 (UF2) を用いた $\gamma = 90$ 度の散在 (Z22), $\gamma = 120$ 度の散在 (Z23) および $\gamma = 144$ 度の散在 (Z24), 上側に凸の半球面状単位葉層 (UF3) を用いた $\gamma = 90$ 度の散在 (Z31), $\gamma = 120$ 度の散在 (Z32) および $\gamma = 144$ 度の散在 (Z33), 下側に凸の半円柱面状単位葉層 (UF4) を用いた $\gamma = 90$ 度の散在 (Z43), $\gamma = 120$ 度の散在 (Z44), $\gamma = 144$ 度の散在 (Z45), 上側に凸の半円柱面状単位葉層 (UF5) を用いた $\gamma = 90$ 度の散在 (Z46), $\gamma = 120$ 度の散在 (Z47) および $\gamma = 144$ 度の散在 (Z48), 叢状単位葉層 (UF6) を用いた $\gamma = 90$ 度の散在 (Z49), $\gamma = 120$ 度の散在 (Z50) および $\gamma = 144$ 度の散在 (Z51) からなる, 合計24種類のらせん状散在体を構築した。

上記のように、らせん状散在体（Z）についてはいずれも各周回における出発方角をずらしたが、これをずらさなかったときの影響を調査するため、合計24種類のらせん状散在体（F）も構築した（第1図F）。FはZに比べて、各段における周回開始方角のみ異なっただけで、他の細部パラメータはZと全く同じであったため、詳しい説明は省略した。ただし、樹冠形記号として上記のZの代わりにFを用いた。

単位葉層の傾きが乱雑ならせん状散在体（T） らせん状散在体（Z）では、それぞれに用いた単位葉層の傾きは一定であった（当初設定角度）。そこで、2. 記した方法により傾きを乱雑に変化させたらせん状散在体を構築した（第1図T）。この傾きを除く他の条件についてはZに用いたものと同等にしたまま、合計24個の樹冠原形を作成した。この場合、ZをTに変え、樹冠原形番号（数字部分）はそのまま残した。

単位葉層の大きさが乱雑ならせん状散在体（W） らせん状散在体（Z）においては、それぞれに用いた単位葉層の大きさは一定であった。そこで、2. 記した方法により大きさを乱雑に変化させたらせん状散在体を構築した（第1図W）。これ以外の条件にはZに用いたものを用い、合計24個の樹冠形を作成した。この場合、ZをWに変え、樹冠形番号（数字部分）はそのまま残した。

単位葉層の傾きと大きさが乱雑ならせん状散在体（Y）
2. 記した方法により単位葉層の傾きと大きさの両者を乱雑に変化させたらせん状散在体を構築した（第1図Y）。この傾きと大きさを除く他の条件については、類型Zの各樹冠原形に用いたものと同等にしたまま、合計24種類の樹冠原形を構築した。この場合、類型記号としてZをYに変え、樹冠原形番号（数字部分）はそのまま残した。

樹冠中心部からの放射状散在体（P） 樹冠中心部からの放射状散在体は同一形状の単位葉層を輪状かつ複数段にわたり散在させたものである（第1図P）。樹冠中心部から放射状になるように、単位葉層の高さによって傾斜角度が変わり、散在方角数も増えた点、上記一連の散在体とは異なった。設定葉ブロック数（656個）の近傍にできるだけ近づけるため、単位葉層の大きさや散在総数（＝段数×方角数）を調節した。単位葉層の種類により、細い直線状（P01）、細い噴水状（P04）、細長の三角形板状（P07）、立体的枝分かれ状（P08）、平面的枝分かれ状（P10）、針状（P12）、鈍鋸歯状（P13）、小型6角

形板状（P14）、下側に凸の小型半円柱面状（P17）および上側に凸の小型半円柱面状（P18）からなる、合計9種類の放射状散在体を構築した。なお、この場合の単位葉層の説明は省略したが、第3図に示した単位葉層をやや小形にしたものであった。

樹冠底部からの放射状散在体（N） 樹冠底部からの放射状散在体は同一形状の単位葉層が輪状かつ複数段にわたり散在させたものであるが（第1図N）、単位葉層の高さにより傾斜角度が変わったが、Pと比べて異なったことは樹冠底部から放射状という点であった。Pの場合と同じ理由から単位葉層の大きさや散在総数を調節した。単位立体的の種類により、細い直線状（N01）、細い噴水状（N04）、細長の三角形板状（N07）、平面的枝分かれ状（N08）、針状（N12）、鈍鋸歯状（N13）、下側に凸の小型半円柱面状（N18）および上側に凸の小型半円柱面状（N19）からなる、合計8種類の樹冠原形底部からの放射状散在体を構築した。なお、Pと同様、単位葉層の説明については省略した。

大型単位葉層の少数分離散在体（O） 大型単位葉層の種類（第3図UF）、数および配置の仕方を組み合わせることで以下の散在体（O）を構築した（第1図O）。なお、大型単位葉層の傾斜角度はいずれの場合にも45度とした。南北方向に2個配置するものとして、大型単位葉層が楕円板状（O01、第3図UF9、以下も同様）、立体的枝分かれ状（O07、UF10）およびらせん状散在体（O11、UF11）、さらに、東西方向に2個配置するものとして、大型単位葉層が楕円板状（O02）、立体的枝分かれ状（O08）およびらせん状散在体（O12）からなる、合計6個を構築した。次に、回転角度間隔が120度で3個配置するものとして、1個を南にした単位葉層が楕円板状（O13）、立体的枝分かれ状（O19）およびらせん状散在体（O23）、さらに、1個を北にした大型単位葉層が楕円板状（O14）、立体的枝分かれ状（O20）およびらせん状散在体（O24）からなる、合計6個を構築した。次に、2段構成で合計4個配置したが、下段の2個を南北、上段の2個を東西に配置するものとして大型単位葉層が楕円板状（O25）、立体的枝分かれ状（O31）およびらせん状散在体（O35）、さらに、下段の2個を東西、上段の2個を南北に配置するものとして、大型単位葉層が楕円板状（O26）、立体的枝分かれ状（O32）およびらせん状散在体（O36）からなる、合計6個の分離散在体を構築した。次に、周回角度間隔が144度で2周することで合計5個配置するものとして、下

段の出発方角が南の場合の、大型単位葉層が楕円板状 (O37)、立体的枝分かれ状 (O43) およびらせん状散在体 (O47)、さらに、下段の出発方角が北の場合の、大型単位葉層が楕円板状 (O38)、立体的枝分かれ状 (O44) およびらせん状散在体 (O48) からなる、合計6種類を構築した。

上下組み合わせによる樹冠原形 (I) 棚状連続体の上に散在体の配置、異なる2種類の回転体の上下組み合わせ、異なる2種類の非回転体の上下組み合わせなどのように、上下を組み合わせた新しい樹冠原形を構築した (第1図I)。この場合、横幅にはグリッド幅、下部分の縦幅には4ブロックから10ブロックまでの長さ (7B)、上部分の縦幅には11ブロックから18ブロックまでの長さ (8B) を使用できるように、それぞれの寸法を変更した。また、この組み合わせの命名には「下部分+上部分」のように表現した。「水平棚+垂直棒」の林立 (I01)、「東から見た場合のU字棚+垂直棒の林立」 (I02)、「東から見た場合のV字棚+垂直棒の林立」 (I03)、「南から見た場合のU字棚+垂直棒の林立」 (I04)、「南から見た場合のV字棚+垂直棒の林立」 (I05)、「円柱+半球」 (I06)、「倒立円錐台+円錐台」 (I07)、「倒立円錐台+半球」 (I08)、「倒立円錐台+円柱」 (I09)、「半球+円柱」 (I10)、「半球+円錐台」 (I11)、「倒立四角錐台+四角錐台」 (I12)、「倒立三角錐台+三角錐台」 (I13)、「四角柱+四角錐台」 (I14) および「四角錐台+四角柱」 (I15) からなる、合計15種類の上下組み合わせによる樹冠原形を構築した。

南北組み合わせによる樹冠原形 (J) 棚状連続体どうし、あるいは、散在体と棚状連続体のように、南北を組み合わせた樹冠原形を構築した (第1図J)。この場合、縦幅には、4ブロックから18ブロックまでの長さ (15B)、南部分の横幅にはグリッド南端ブロックから10ブロックまでの長さ (10B)、北部分の横幅には11ブロックからグリッド北端ブロックまでの長さ (11B) を使用できるように、それぞれの寸法を変更した。この組み合わせの命名には「南部分+北部分」のように表現した。「水平棚+斜線棚」 (J01)、「水平棚+飽和曲線棚」 (J02)、「水平棚+双曲線棚」 (J03)、「斜線棚+水平棚」 (J04)、「斜線棚+双曲線棚」 (J05)、「双曲線棚+水平棚」 (J06)、「細い垂直棒の林立+斜線棚」 (J07) および「細い垂直棒の林立+双曲線棚」 (J08) からなる、合計8種類の南北組み合わせによる樹冠原形を構築した。

細形樹冠モデル4個からなる樹冠原形 (R) 割り当て区

画内に東西幅9B、南北幅9Bおよび縦幅15Bの細形立体4個を配置し (第5図右下)、これを1個の樹冠原形とみなした (第1図R)。なお、以下の文中、樹冠原形の説明文のみでは分かりにくいものについては抜粋し、これらの積木構造図を第5図に示した。細形立体の種類により、中空化底無しの四角柱4個 (R09)、中空化底無しの円柱4個 (R10)、中空化底無しの南北方向に縦長の楕円球台4個 (R11)、中空化底無しの東西方向に縦長の楕円柱4個 (R12、第1図)、中空化底無しの三角柱4個 (R15)、中空化底無しの四角錐4個 (R17)、中空化底無しの倒立四角錐4個 (R18、第5図)、葉層断面形が水平線状の多段輪状連続体4個 (R19)、葉層断面形が右下がり斜線状の多段輪状連続体4個 (R20)、単位葉層が右下がり斜線状の多段輪状散在体4個 (R21)、単位葉層が水平線状の多段輪状散在体4個 (R22)、葉層断面形が水平線状のらせん状連続体4個 (R23、第5図)、単位葉層が水平矩形状のらせん状散在体4個 (R24)、単位葉層が右下がり斜線棒状のらせん状散在体4個 (R25、第5図)、単位葉層が水平矩形状のらせん状連続体4個 (R26、第5図)、単位葉層が平面的に枝わかれした立体的多段輪状散在体4個 (R27) および単位葉層が平面的に枝わかれした立体的らせん状散在体4個 (R28、第5図)、合計17種類の細形立体4個からなる樹冠原形を構築した。

扁平樹冠モデル2個からなる樹冠原形 (U) 割り当て区画内に東西幅21B、南北幅8Bおよび縦幅15Bの南北方向に長い扁平状の立体 (以下、扁平立体) 2個を配置し (第5図右下)、これを1個の樹冠原形とした (第1図U)。なお、上述と同様、分かりにくいものについては抜粋し、これらの積木構造図を第5図に示した。扁平立体の種類により、中空化底無しの東西方向に縦長の楕円柱2個 (U12、第5図)、中空化底無しの三角柱2個 (U15)、中空化底無しの四角柱2個 (U16)、中空化底無しの四角錐2個 (U17)、中空化底無しの倒立四角錐2個 (U18)、単位葉層が右下がり斜板状の多段X字形輪状散在体2個 (U19、第5図)、単位葉層が水平板状の多段X字形輪状散在体2個 (U20、第5図)、単位葉層が右下がり斜板状の多段一文字形輪状散在体2個 (U21、第5図)、単位葉層が水平板状の多段一文字形輪状散在体2個 (U22、第5図) および単位葉層が枝わかれした平面状の多段X字形輪状散在体2個 (U30、第5図) からなる、合計10種類の樹冠原形を構築した。ここで、多段X字形とは扁平な区画における2本の対角線上に葉層を配置したもの

で、多段一文字形とは扁平な区画における1本の対角線上に葉層を配置したものであった。

CACOAS起源の樹冠原形(L) CACOASにより開心形、変則主幹形およびY字形に仕立てたリンゴ‘ふじ’の樹齢15年目の葉数分布データ（配列変数データ）を用いた。ただし、これらはCACOASによる毎年の整枝剪定プロセスを経て構築されたことから、樹高や樹冠底部高、葉

が存在するブロック総数、葉ブロック内の葉密度などには自然の樹のような偶然性や乱雑さを多く含み、本実験設定条件（1.を参照）と異なった。そこで、本実験設定条件を満たすように配列変数データを一部修正した。すなわち、CACOASを用いて作成した葉ブロックの分布データ（山本，2015）のうち、本実験条件のように、樹高と底部高の制限をはみ出る葉ブロックを削除した後、

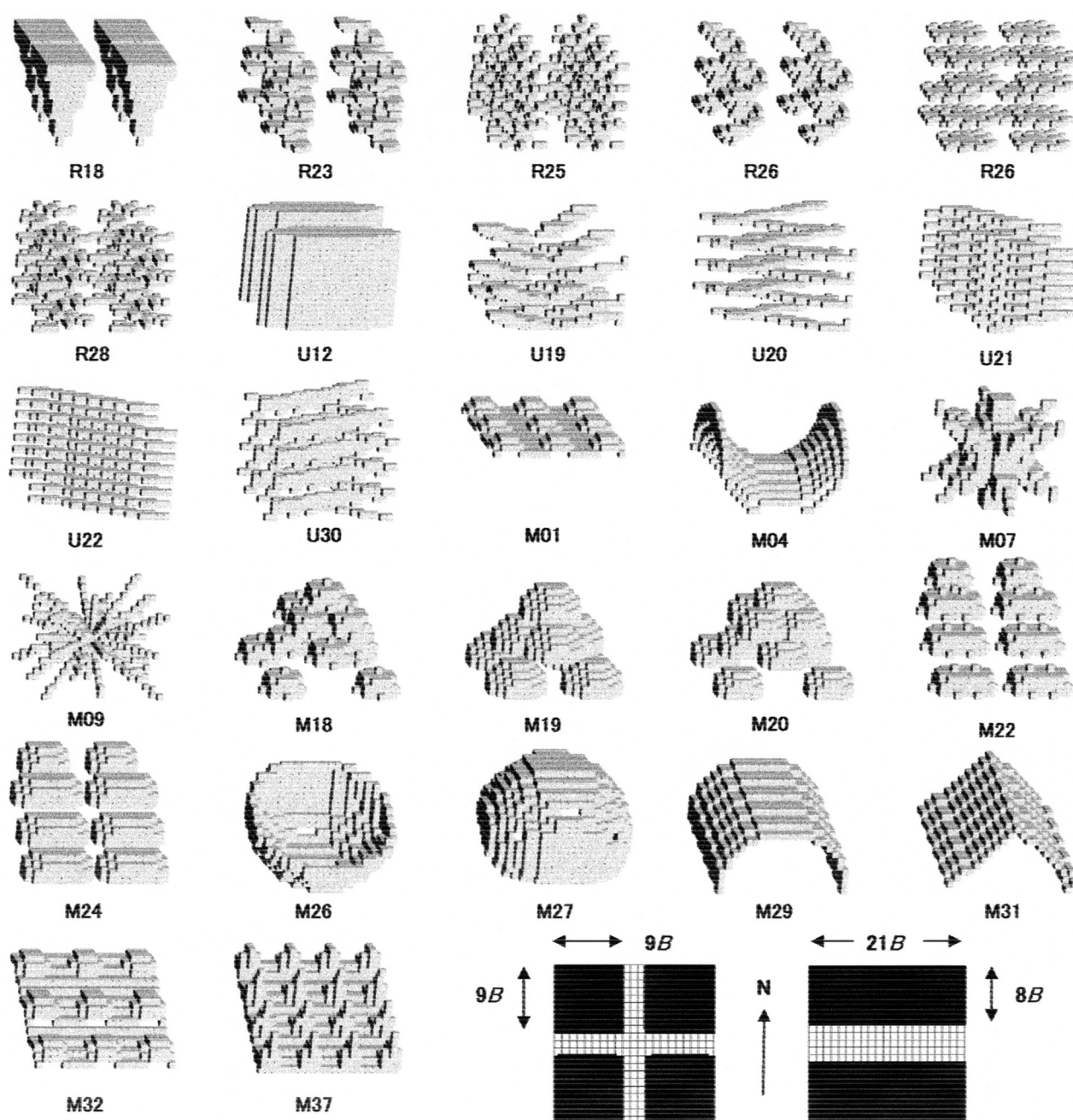


Fig. 5 Several solid models in R, U and M types of canopy shape as prototype. The alphabet and the numeral indicate the type and the kind of canopy shape, respectively. The four parts in the set land compartment of the R type and the two parts of the U type were shown at the lower part in the right.

乱数を用いて葉ブロック数を656個に調整した。次に、葉ブロック内の葉密度を均一にして、これをCACOAS起源の樹冠原形(L)とした(第1図L)。上記3種類に仕立てた樹から無作為的にそれぞれ5樹ずつ選び、上記修正を施し、開心形の樹冠原形(L01~L05)、変則主幹形の樹冠原形(L06~L10)およびY字形の樹冠原形(L11~L15)からなる、合計15種類の樹冠原形を構築した。

その他の特殊な樹冠原形(M) 樹冠の外形などは明瞭であるが、上記タイプのいずれにも分類できない樹冠原形を種々考案し、これらから試験可能な樹冠原形に絞って、その他の特殊な樹冠原形(M)とした(第1図M)。なお、以下文中、分かりにくいものについては抜粋し、これらの積木構造図を第5図に示した。その他の特殊な樹冠原形(M)として、水平棚の一部が小さな半球面状(上側に凸)に変形したもの(M01, 第5図)、水平棚の一部が中位の半球面状(上側に凸)に変形したもの(M02)、ところどころに突起を付随した水平棚(M03)、東西方向に向いた鞍形(M04, 第5図)、南北方向に向いた鞍形(M05)、32本からなる全方向放射状突起(M07, 第5図)、32本からなる中空の全方向放射状突起(M08)、64本からなる全方向放射状突起(M09, 第5図)、72本からなる全方向放射状突起(M09)、星形(M15)、中空化した星形(M16)、大球の上側半球面が山盛り状に散在したもの(M17)、中球の上側半球面が山盛り状に散在したもの(M18, 第5図)、大球の南上側4分の1球面が山盛り状に散在したもの(M19, 第5図)、中球の南上側4分の1球面が山盛り状に散在したもの(M20, 第5図)、中球の上側半球面が南斜面状に散在したもの(M21)、大球の上側半球面が南斜面状に散在したもの(M22, 第5図)、中球の南上側4分の1球面が南斜面状に散在したもの(M24, 第5図)、南上側に凸になるように傾けた半球面(M25)、南下側に凸になるように傾けた半球面(M26, 第5図)、南上側に凸になるように傾けた半楕円球面(M27, 第5図)、南下側に凸になるように傾けた半楕円球面(M28)、南上側に凸になるように傾けた半円柱面(M29, 第5図)、南下側に凸になるように傾けた半円柱面(M30)、南下側に凸になるように折りたたんだ四角形の半開き状態(M36)、南上側に凸になるように折りたたんだ四角形の半開き状態(M31, 第5図)、南斜面棚の一部が上側に凸の大きい半球面状に変形したもの(M32, 第5図)、南斜面棚の一部が上側に凸の中位の半球面状に変形したもの(M33)、

南側に傾いた楕円面(M34)およびところどころに突起を付けた南斜面棚(M37, 第5図)からなる、合計29種類を構築した。

等間隔散在体(D) 等間隔散在体は小型の単位葉層を割り当て空間内に等間隔になるように散在したもので(第1図D)、葉ブロック数の設定値(656個)の近傍になるように、単位葉層の大きさと散在間隔(3軸方向)を調整した。用いた単位葉層の種類により、小さい2分の1の円弧(D02, 第3図UF12を使用、以下も同様)、小さい矩形板(D05, UF13)、小さい十文字板(D10, UF14)、小球面上半分(D23, UF15)および単一葉ブロック(D28, UF16)からなる、合計5種類の等間隔散在体を構築した。

無作為的散在体(K) 無作為的散在体は割り当て空間における単位葉層の配置位置を乱数により決めたもので(第1図K)、用いた単位葉層の種類により配置数が異なった。いずれも葉ブロック数設定値(656個)の近傍に到達するまで散在させた。乱数により配置位置が完全に決まるため、用いた乱数系列の違いによる影響を避けるため、同一の単位葉層を対象に、3種類の乱数系列を用いてそれぞれ散在させた。単位葉層が単一の葉ブロック(第3図UF16, 以下も同様)で乱数系列1による散在(K01)、乱数系列2による散在(K02)および乱数系列3による散在(K03)、単位葉層が小さい矩形(UF17)で乱数系列1による散在(K13)、乱数系列2による散在(K14)および乱数系列3による散在(K15)および単位葉層が小さい楕円球(UF18)で乱数系列1による散在(K16)、乱数系列2による散在(K17)および乱数系列3による散在(K18)からなる、合計9種類の無作為的散在体を構築した。次に、単一の葉ブロック(UF16)を無作為的に散在させながらも、同時に散在密度なども変えたものとして、3軸方向の散在密度の変更あるいは渦巻き状の散在密度を用いて散在させたケースも設けた。すなわち、上側ほど密度が高くなる無作為的散在体(K04)、下側ほど密度が高くなる無作為的散在体(K05)、北側ほど密度が高くなる無作為的散在体(K06)、南側ほど密度が高くなる無作為的散在体(K07)、北側と下側ほど密度が高くなる無作為的散在体(K08)、南側と上側ほど密度が高くなる無作為的散在体(K09)、渦巻き状に密度が変化するようにした無作為的散在体(K10)および逆渦巻き状に密度が変化するようにした無作為的散在体(K11)からなる、合計8種類の無作為的散在体を構築した。

4. 樹冠原形の形状をできるだけ保ちながら葉ブロック数を調整するための3種類の処理 (t, w および z)

共通ルールである葉ブロック数一定を守るため、中味の詰まった回転体、非回転体およびこれらの上下組み合わせの樹冠原形に限定して、表層を葉ブロック1個の厚さのみにし、内部を空洞化し、さらに平坦な底部分が存在すればこれを除去した後に、最後に乱数を用いて葉ブロック数調整処理を施した（以下、中空化処理 (t)、第6図上）。一方、棚状の樹冠原形のほとんどは葉ブロック数不足になったため、葉ブロックを追加せねばならない。ただし、通常、棚の下側に追加できないので、棚の上側に乱数を用いて葉ブロックを分散追加する処理 (w) を施した（第6図下）。さらに、全ての樹冠原形を対象に、葉ブロック数の過不足に対応して、乱数を用いて無作為的に追加あるいは削除する処理 (z) を施した（第6図中）。この場合、ほとんどが削除処理であったものの、追加するときには葉ブロックに隣接した空ブロックを葉ブロックに変え、樹冠原形の形状をできるだけ保つようにした。なお、第6図からわかるように、中味の詰まった回転体、非回転体およびこれらの上下組み合わせの樹冠原形の場合、t処理とz処理とでは大きな形状の違いが存在したので（第6図上と中）、類型として別扱いとし、これを含め、類型合計数は合計29個になった。

5. 類型内比較のための各樹冠形5反復実験

本シミュレーション計算には乱数を用いており、このときの乱数系列が同じならば計算結果は全く同じになり、反復実験は不要である。しかし、同一類型内、光環境や樹冠形状値の平均値多重比較を行うには、偶然誤差を導入し、反復実験データを入手する必要がある。そこで、3. に記した合計528樹冠形に、5種類の乱数系列を用いて、それぞれ、5反復構築した。合計5×528個の樹冠形データを用いてOLEASにより光環境のシミュレーション実験を行い、また、樹冠形状値も算出した。

6. 実験前提条件を吟味するための試験

4. までのシミュレーション実験は、葉ブロック内葉密度の分布が均一、葉ブロック内葉密度は中庸レベル、1辺4mのグリッドの使用および供試品種は‘ふじ’という前提条件で行われた。この前提条件下で得られた光環境良否の序列が、これら条件を変えた場合でも成立するかどうかを吟味する必要がある。このための実験として、

①葉密度分布が均一の代わりに、強い不均一分布あるいは弱い不均一分布の場合、②中庸レベルの葉密度の代わりに高葉密度あるいは低葉密度の場合、③異なるサイズのグリッドを使用した場合、および、④‘ふじ’の代わりに異なる樹種・品種を用いた場合のそれぞれについてシミュレーション実験を行った。

1) 葉ブロック内葉密度分布の変更方法

弱い不均一分布と強い不均一分布の発生手法として、モンテカルロシミュレーション手法 (Mize・Cox, 1969) を用いた。葉密度分布が均一の場合には全ての葉ブロックとも15.28枚の葉を用いたのに対し、弱い不均一分布の場合には15.28枚を中心に標準偏差1枚からなる正規

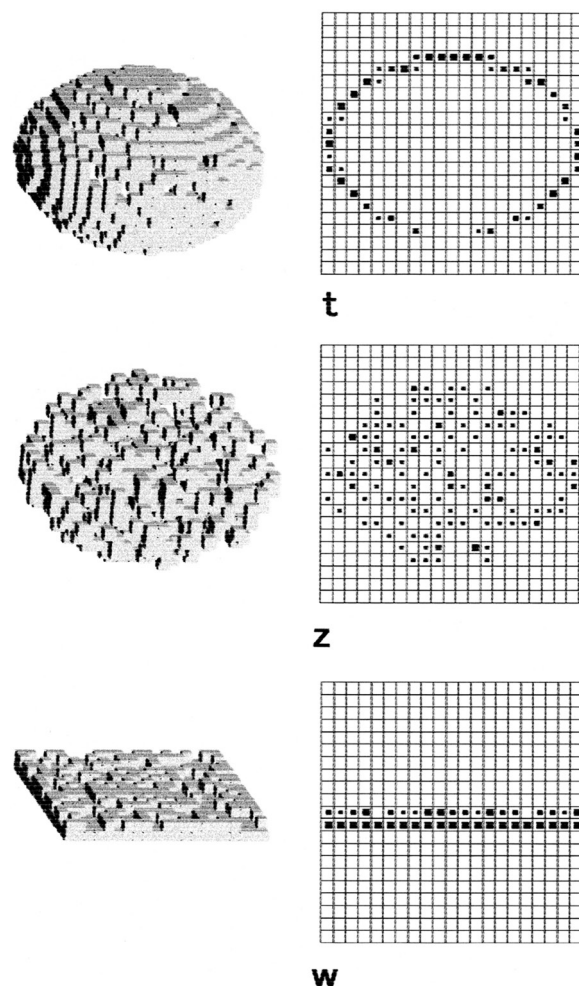


Fig. 6 Explanatory drawings of treatments for adjusting the number of leaf blocks. Upper: being empty (t). Middle: deleting leaf blocks using random number (z). Lower: adding leaf blocks on a trellis using random number (w). Left: solid models after the treatments. Right: projected plans of numbers of leaves in three rows at the central part of the grids after the treatments.

分布関数、強い不均一分布の場合には15.28枚を中心に標準偏差2枚からなる正規分布関数に、それぞれ、一様乱数を交差させて葉ブロック内葉密度を発生させ、かつ、樹冠全体として総葉量は変わらないようにしたうえで、他の実験前提条件は変えないままOLEASによるシミュレーション実験を行った。

2) 葉ブロック内葉密度レベルの変更方法

上記4. までの実験に用いた中庸レベルの葉密度の1.3倍および0.7倍になるように葉密度を変更し、それぞれ、高葉密度および低葉密度とし、総葉量を除く他の実験前提条件は変えないままOLEASによるシミュレーション実験を行った。

3) グリッドサイズの変更方法

上記4. までの実験におけるグリッドサイズの1.3倍（グリッド1辺が5.2m、樹高制限も1.3倍）および0.7倍（グリッド1辺が2.8m、樹高制限も0.7倍）に変えた。さらに、葉ブロック内葉数もブロック体積に比例した枚数に変え、それぞれ、大グリッドおよび小グリッドとして、他の実験前提条件は変えないままOLEASによるシミュレーション実験を行った。ただし、グリッドサイズの変更に対応して、樹列間距離も変更した。

4) 品種の変更方法

リング‘ふじ’の代わりにセイヨウナシ‘ラ・フランス’、オウトウ‘佐藤錦’、カキ‘平核無’およびクリ‘筑波’のそれぞれの個葉面積や減衰係数推定計算用パラメータ（山本ら、1990；山本・畠，1991；山本・奥山，2004）を用い、他の実験前提条件は変えずにOLEASによるシミュレーション実験を行った。ただし、園地当たり葉面積指数（LAI₀）も変えなかったことから、個葉面積が変わったことに対応して、葉ブロック内葉密度も変更した。

7. 樹冠形構築などに関するプログラム計算処理のアルゴリズム

樹冠形構築と言っても、グリッド内に葉ブロックを配置し、意図する形状の樹冠形を構築するための計算処理にすぎない。葉ブロック内に所定の葉数を格納するには3次元の配列変数を用いたが、このときの配列変数データは、同時にOLEASによるシミュレーション計算への入力データになった。なだらかな形状を有する回転体な

どについては、最初、関数を用いて設計され、そこで得られた三次元データは、次に、グリッドを構成するブロックに分割格納され、三次元配列データとして表現された。この場合、関数を扱う一般的な空間座標系（小倉・矢野，1964）とグリッド座標系（山本，1999）が同一でなかったため、一般的な空間座標系からグリッド座標系にシフトする処理を必要とした。また、輪状連続体、輪状散在体、らせん状連続体、らせん状散在体などを構築するとき、グリッド座標系で表現された葉ブロックの三次元配列データに回転処理を施した。この場合、回転式特有の空間座標系（山本，1983）に一度シフトし、回転処理後に、再度グリッド座標系に戻す処理を必要とした。このような煩雑な計算処理を除くと、樹冠形構築に関するプログラム計算処理のほとんどは、配列データと様々な論理判断処理を交えた単純なループ計算処理から成り、よって、これらのアルゴリズムの詳細については省略した。さらに、これらの配列変数データを用いて、別プログラム（山本・畠，1991；山本，1999）により葉数投影図や積木構造図などの作図を行った。OLEASを用いたシミュレーション実験および樹冠形状値の計算方法の詳細については既報（山本，2014；山本，2015）に準じた。

結果および考察

1. 528樹冠形の光環境関連データと樹冠形状値の変動幅

528樹冠形におけるCDMPFFD、ODMPFFD、CDMCVおよびODMCVの平均値、最大値、最小値、標準偏差、変動係数（%）および最大差の割合（=（最大値－最小値）／平均値×100%）を集計した（第1表）。CDMPFFDとODMPFFDの単位（ $\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ）については以降の文中では省略した。また、主たる樹冠形状値についても上記同様の統計値を算出し、第1表に示した。

CACOASにより作られた118樹冠形の樹齢15年目の果樹園光環境データ（山本，2015）と本実験結果（第1表）を比べてみよう。既報におけるCDMPFFDの変動幅は265.4～367.5、その標準偏差は19.1、変動係数は6.2%および最大差の割合は32.9%であった（山本，2015）。また、ODMPFFDの変動幅は115.1～158.8、その標準偏差は9.9、変動係数は7.1%および最大差の割合は31.3%であった（山本，2015）。本実験結果（第1表）から、CDMPFFDの変動幅、標準偏差、最大差の割合ともに増大した。特

に、CDMPPFDの最大値は1.30倍、最大差の割合は1.70倍と著しく増大し、また、ODMPPFDの最大値は1.16倍、最大差の割合は1.23倍と増大した。両DMPPFDの最大値が増大したことは、樹冠形の改変により、光環境の改善ひいては光合成量の増大の可能性を示唆するもので、研究目的に照らして極めて意義深いものと思われる。ただし、CDMCVとODMCVについては既報では算出していなかったので比較できなかった。

第7図に528樹冠形における光環境関連データ間の散布図を示した。CDMPPFDとCDMCVの間あるいはODMPPFDとODMCVの間に高い負の相関関係（ $r = -0.948^{***}$ あるいは $r = -0.806^{***}$ ）が認められた（第7図）。すなわち、樹冠内に光がまんべんなく浸透し、光環境が均一なほど光環境は良好であることを示す。この背景として、受光態勢の不良な樹冠では、樹冠表面（強光域）の光の強さはあまり変わらなかったものの、弱光域では非常に暗い陰部分が多く生じ、結果的にDMPPFDの減少と平均変動係数の増大をもたらしたものと考えられる。CDMPPFDとODMPPFDの間に正の相関（ $r = 0.757^{***}$ ）が認められ（第7図）、晴天で光環境良好な樹冠形は曇天でも総じて良好であるものと考えられる。また、CDMCVとODMCVの間にも正の相関が見られ（第7図、 $r = 0.620^{***}$ ）、晴天下光環境が均一な樹冠形ほど総じて曇天でも光環境が均一になりやすいものと考えられる。

既報（山本, 2015）における118樹冠形（樹齢15年目）の樹冠形状値の変動係数に比べて、528樹冠形の樹冠形

状値の変動係数は多くの場合増大した（第1表）。すなわち、伝統的な樹形管理法で生まれた樹冠形状の自由度に比べ、本実験手法の場合、この自由度が増大したと考えられる。

2. 光環境に関する樹冠形の類型間比較

528樹冠形における光環境関連データ（CDMPPFD, ODMPPFD, CDMCVおよびODMCV）について、類型ごと平均し、各平均値の類型間多重比較を行った（第2表）。なお、平均値の多重比較表における分離記号（アルファベット文字）については、CDMPPFDとODMPPFDについては降順、CDMCVとODMCVについては昇順で表示した。また、樹冠形状値についてはCDMPPFDや

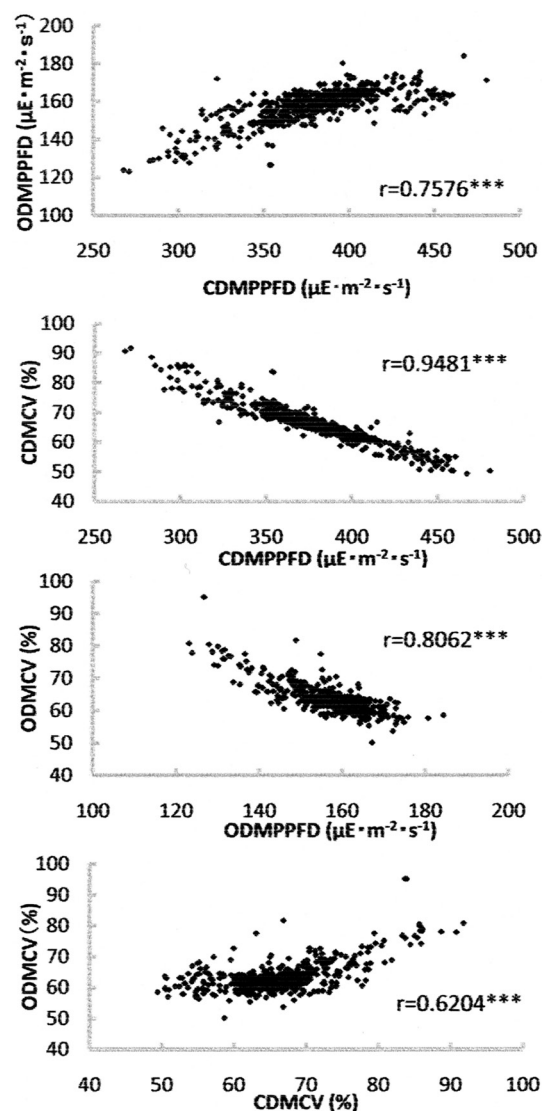


Fig. 7 Relations between CDMPPFDs, ODMPPFDs, CDMCVs and ODMCVs of the 528 orchards.

Table 1 Maximum (MAX), minimum (MIN), mean (M), standard deviation (SD), coefficient of variation (CV,%) and proportion of the largest difference (PLD (=MAX-MIN) / M $\times 100\%$) of CDMPPFDs ($\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), ODMPPFDs ($\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), CDMCVs (%), ODMCVs (%) and several characteristics of canopy shape in the 528 canopies.

	M	SD	CV	MAX	MIN	PLD
CDMPPFD	378.8	35.0	9.2	480.4	267.6	56.2
ODMPPFD	157.8	9.2	5.8	184.3	123.1	38.8
CDMCV	66.1	6.7	10.2	91.8	49.4	64.1
ODMCV	63.4	4.7	7.5	95.2	50.2	71.0
PSLB (%)	84.8	8.7	10.2	100.0	48.1	61.2
TPVD (%)	41.5	19.5	46.9	86.4	0.0	208.2
LAic	3.5	1.7	49.1	12.9	1.7	320.3
PNLES (%)	14.8	8.4	56.9	51.2	0.0	347.1
MCFVD (block)	1.5	0.8	57.0	10.1	1.0	615.1
MCTVD (cm)	118.1	57.8	48.9	285.7	28.3	217.9
MCT3D (cm)	150.7	38.9	25.8	317.3	92.7	149.0
TP3D (%)	50.3	8.4	16.6	77.8	31.1	92.8
LAO (m^2)	9.4	3.2	33.8	16.0	2.2	147.1

ODMPPFDに対する各樹冠形状値の相関係数（山本, 2015）の符号が正ならば降順, 負ならば昇順で表示した。さらに, CDMPPFD, ODMPPFD, CDMCVおよびODMCVの4者のうち, 光環境指標としてはCDMPPFDが最も重要であったことから, 第2表左端の類型名の並べ方はCDMPPFDの降順に示したことを断わっておきたい。第8図に, CDMPPFDとODMPPFDあるいはCDMCVとODMCVの平均値を, それぞれ, 降順あるいは昇順に, 範囲とともに図示した。

以下, 光環境, 葉層分布, 主たる樹冠形状値などに関する類型としての特徴を考察したものである。なお, 文中および表中とも, 樹冠形状値を略号で記したので, ここで, 樹冠形状値名とその略号の対応関係を記しておく。すなわち, 樹冠表面葉ブロック数割合 (PSLB), 閉鎖空間内葉数割合 (PNLES), 葉塊当たり葉ブロック数平均値 (MNLBA), 樹冠占有面積当たり葉面積指数 (LAIc), 樹冠占有面積 (LAO), 上下方向の樹冠厚平均値 (MCTVD), 3方向の樹冠厚平均値 (MCT3D), 上下方向葉ブロック連続数の平均値 (MCFVD), 垂直方向透過度 (TPVD), 3方向透過度 (TP3D) である。また, これらの詳しい内容については既報 (山本, 2015) を参照されたい。ただし, 以下の文中, 類型の表記方法は樹冠原形の類型記号と葉ブロック数調節処理の記号のみとし, 個々の樹冠形識別番号の部分については省略した。

光環境の良否に関する類型間比較の結果, 全体を通じて以下の特徴があげられる。すなわち, CDMPPFDの類型平均値は, 異なる樹冠原形の南北組み合わせ (Jw), 棚状連続体 (Aw), 等間隔散在体 (Dz) などで大きく, CACOAS起源の樹冠形 (Lz) で最も小さかった (第8図および第2表)。ODMPPFDの類型平均値は, 等間隔散在体 (Dz), 種々の葉層断面形の輪状連続体 (Gz), 少数大型立体の分離散在体 (Kz) などで大きく, CACOAS起源の樹冠形 (Lz), 単純回転体状連続体 (BtおよびBz) などで小さかった (第8図および第2表)。CDMCVの類型平均値は異なる樹冠原形の南北組み合わせ (Jw), 棚状連続体 (Aw), 等間隔散在体 (Dz), 種々の葉層断面形輪状連続体 (Gz) などで小さく, CACOAS起源の樹冠形 (Lz), 単純回転体状連続体 (Bt) などで大きかった (第8図および第2表)。ODMCVの類型平均値は, 等間隔散在体 (Dz), 細形立体4個からなる樹冠形 (Rz), 無作為的散在体 (Kz), 種々葉層断面形の輪状連続体 (Gz) などで小さく, CACOAS起源の樹冠形 (Lz) で最も大

きかった (第8図および第2表)。

上記の序列のほか, 以下の幾つの特徴が推察されたので列記しておきたい。棚状連続体 (Aw) の光環境は晴天日で極めて良好であり (第8図および第2表), 直射光の地面への漏れが少なく, 葉層が薄いことが原因と考えられる。回転体や非回転体の樹冠 (Bz, Bt, CzおよびCt) は立体的で縦横に膨らみがあり, 目立った隙間も見られない一方, 大きな日陰部分が日中常時出現し, 光環境が劣ったものと考えられる。これらの樹冠形は剪定処理された庭園木や街路樹にしばしば見られるが, 光環境改善よりも景観を重視して生まれたものと考えられる。等間隔散在体 (Dz) のCDMPPFDとODMPPFDの類型平均値は, それぞれ, 3番目と1番目に大きく, CDMCVとODMCVの類型平均値は, それぞれ, 3番目と1番目

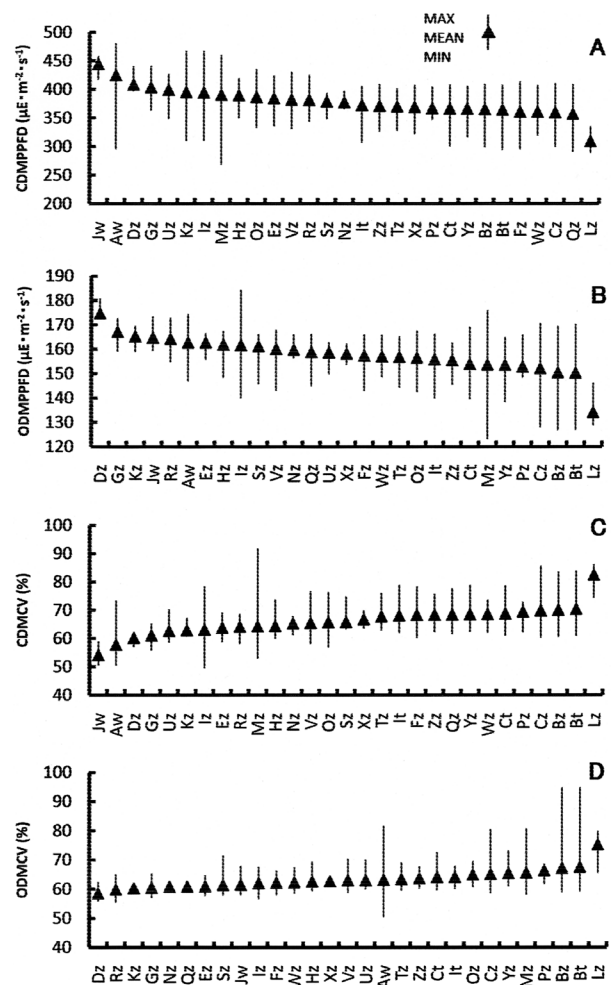


Fig. 8 The means and the ranges of CDMPPFDs (A), ODMPPFDs (B), CDMCVs (C) and ODMCVs (D) in each type of canopy shape. These types were arranged in descending order of the means in A and B, and were arranged in ascending order in C and D.

Table 2 The comparisons of CDMPPFD, ODMPPFD, CDMCV, ODMCV and several characteristics of canopy shape between the 29 types of canopy shape.

Types	n	CDM PPFD	ODM PPFD	CDM CV	ODM CV	PSLB	LAic	MCT VD	MCT 3D	LAO	MCF VD	PNL ES	TPVD
Jw	8	444.1 a ^z	164.7 abcd	54.1 a	61.4 abc	86.5 abcd	2.0 a	33.5 a	45.9 abcd	14.4 a	13.2 abcd	13.2 abcd	10.0 a
Aw	29	428.7 a	163.2 abcd	57.2 ab	63.6 abc	92.0 ab	2.6 a	47.8 a	48.6 cd	14.3 a	7.9 ab	7.9 ab	10.6 a
Dz	5	408.0 ab	174.6 a	60.2 abc	58.4 a	62.0 e	5.4 cde	236.3 h	73.2 g	5.3 gh	37.9 e	37.9 e	66.4 gh
Gz	19	403.0 ab	167.1 ab	61.0 abc	60.4 a	82.8 cd	3.4 abc	160.0 fg	52.7 de	9.7 bcde	17.2 cd	17.2 cd	39.7 bcde
Uz	10	398.8 ab	158.6 cdefg	62.6 abcd	63.0 abc	87.1 abcd	5.3 cde	170.4 fgh	56.4 def	6.2 fgh	12.7 abcd	12.7 abcd	58.1 fgh
Kz	17	395.5 b	165.2 abc	62.9 bcd	60.3 a	93.8 a	2.5 a	91.3 bcde	36.6 a	11.2 abc	6.1 a	6.1 a	30.1 abcd
Iz	15	393.9 b	161.7 abcde	63.1 bcd	61.9 abc	90.1 abc	2.4 a	76.7 abc	43.7 abc	12.0 ab	11.0 abcd	11.0 abcd	34.4 abcde
Mz	30	389.6 b	153.6 efg	64.2 cd	65.6 bc	83.5 cd	2.9 ab	59.0 ab	51.6 de	11.5 ab	15.9 cd	15.9 cd	28.2 abc
Hx	24	389.1 b	161.9 abcd	64.4 cd	62.5 abc	83.1 cd	3.2 ab	124.9 ef	50.7 cde	9.5 bcde	16.2 cd	16.2 cd	40.7 bcde
Oz	24	386.5 b	156.4 defg	65.7 cd	64.9 abc	87.8 abcd	2.5 a	85.1 abcd	46.9 bcd	11.2 abc	11.5 abcd	11.5 abcd	30.1 abcd
Ez	20	382.5 b	162.7 abcd	63.7 cd	60.9 abc	88.1 abcd	3.5 abc	117.4 cdef	49.4 cd	9.1 bcdef	11.8 abcd	11.8 abcd	43.3 def
Vz	24	381.9 b	160.1 bcdef	65.5 cd	63.0 abc	83.5 cd	3.3 abc	126.3 ef	51.1 cde	9.2 bcdef	15.9 cd	15.9 cd	42.6 def
Rz	17	381.4 b	164.2 abcd	64.1 cd	59.8 a	78.4 d	4.5 bcd	181.0 gh	61.8 fg	6.8 efgh	21.1 d	21.1 d	58.0 fgh
Sz	24	378.4 b	161.2 bcde	65.8 cd	61.3 ab	92.3 ab	3.0 ab	100.8 cde	41.3 ab	9.6 bcde	7.4 ab	7.4 ab	39.9 bcde
Nz	8	377.1 b	159.6 bcdefg	65.2 cd	60.8 ab	80.0 cd	3.2 abc	113.3 cdef	50.2 cde	9.2 bcdef	19.7 d	19.7 d	42.5 cdef
It	10	372.5 b	155.8 defg	68.0 cd	64.1 abc	88.7 abcd	2.7 ab	98.6 bcde	42.7 abc	11.4 abc	9.2 abc	9.2 abc	24.4 ab
Zz	24	371.1 b	158.5 b	67.5 cd	62.8 abc	85.9 abcd	3.9 abc	164.1 fg	49.7 cd	7.4 defg	13.7 abcd	13.7 abcd	53.7 efg
Tz	24	369.8 b	156.7 defg	67.8 cd	63.3 abc	85.0 bcd	3.1 ab	118.4 cdef	49.1 cd	9.0 cdef	14.8 bcd	14.8 bcd	43.4 def
Xz	24	368.8 b	153.5 efg	68.5 cd	65.4 abc	83.4 cd	3.1 ab	101.9 cde	50.2 cde	9.3 bcdef	16.0 cd	16.0 cd	41.9 cdef
Wz	24	367.2 b	157.5 cdefg	67.6 cd	62.4 abc	87.3 abcd	3.5 abc	124.0 def	47.7 bcd	8.4 cdefg	12.6 abcd	12.6 abcd	47.2 efg
Pz	9	366.4 b	152.8 efg	69.4 cd	66.3 bc	84.0 cd	3.5 abc	137.1 efg	48.9 cd	8.5 cdefg	15.0 bcd	15.0 bcd	46.6 defg
Yz	24	366.0 b	155.3 b	68.4 cd	63.6 abc	84.3 cd	3.2 abc	112.9 cde	49.9 cd	9.0 cdef	15.6 cd	15.6 cd	43.9 def
Bz	14	364.9 b	150.4 g	70.0 cd	67.2 bc	82.4 cd	2.8 ab	87.9 abcde	47.4 bcd	10.4 bc	18.0 cd	18.0 cd	34.8 bcde
Ct	12	364.0 b	153.0 efg	69.2 cd	64.4 abc	86.7 abcd	3.0 ab	103.4 cde	46.8 bcd	10.3 bcd	13.8 abcd	13.8 abcd	38.7 bcde
Bt	26	361.0 b	149.6 g	70.6 d	67.6 c	81.1 cd	2.8 ab	87.3 abcde	48.0 bcd	11.4 abc	17.0 cd	17.0 cd	34.8 bcde
Fz	24	360.6 b	157.4 cdefg	68.3 cd	62.1 abc	82.2 cd	5.8 de	204.4 h	58.4 ef	5.4 gh	17.4 cd	17.4 cd	66.1 gh
Cz	13	359.5 b	151.1 fg	70.3 cd	65.4 abc	85.7 abcd	3.0 ab	103.8 cde	48.1 bcd	9.8 bcde	12.8 abcd	12.8 abcd	37.2 bcde
Qz	24	356.7 b	158.7 cdefg	68.4 cd	60.8 ab	81.4 cd	6.8 e	220.2 h	60.9 f	4.8 h	18.2 d	18.2 d	70.2 h
Lz	15	309.2 c	134.1 h	82.5 e	75.2 d	67.5 e	3.9 abc	80.3 abcd	60.8 f	7.3 defgh	31.2 e	31.2 e	54.3 efg
Units		$\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	$\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	%	%	%		cm	cm	m ²	block	%	%

^z Different letters indicates significance at 5% level by Tukey's multiple range test.

に小さかったことから、等間隔散在体（Dz）の光環境は著しく良好であったと考えられる（第8図および第2表）。しかし、ほとんどの樹冠形状値の類型平均値は下位にあり、樹冠形状値からこの原因を解明できず、大変興味深い結果となった。無作為的散在体（Kz）のCDMPPFDとODMPPFDの類型平均値は、それぞれ、6番目と3番目に大きく、CDMCVとODMCVの類型平均値は、それぞれ、6番目と3番目に小さく（第8図および第2表）、光環境は良好であったと考えられる。小さい葉層が割り当て空間（直方体）いっぱい無作為的に分布することから、日陰部分が集中すること無く、樹冠内は1日を通して光環境のむらが少ないことが考えられ、特に曇天日でこの傾向が強いものと考えられる。CACOAS起源の樹冠原形（Lz）におけるCDMPPFDとODMPPFDの類型平均値はともに29番目に大きく、CDMCVとODMCVの類型平均値はともに29番目に小さかった（第8図および第2表）。よって、CACOAS起源の樹冠形の光環境は著しく不良と考えられる。また、樹冠形状値の類型平均値

の序列の多くが28番目であった。これらの理由として、伝統的な整枝剪定法に準拠した結果、割り当て空間を有効に活用できず、投射光の地面漏れが多い反面、葉層部が集中しやすく、日陰部分も多く発生し、光環境の不均一度が際立ったものと考えられる。

しかし、いずれの光環境関連データも各類型内の変動幅が大きく、平均値多重比較における分離は一部を除いて困難であった（第2表）。また、多くの場合、平均値の序列に対する最大値あるいは最小値の序列の平行関係は認められなかった（第8図）。さらに、一部の樹冠形状値の平均値に有意差が認められたものの、ほとんどで類型内変動幅が非常に大きく、これらの平均値の分離は困難であった（第2表）。したがって、光環境改善要因の抽出のためには、類型内変動や全樹冠形における変動を解析する必要がある。

3. 光環境良否に関する類型内比較

CDMPPFD, ODMPPFD, CDMCV, ODMCV および主

たる樹冠形状値のそれぞれについて、同一類型に属する樹冠形間の平均値多重比較を行い、上記数値間の相関行列を算出した。なお、光環境関連データ比較表（第3、4および5表）における樹冠形名の並べ順については、最も重要であるCDMPPFDの降順にしたことを断わっておきたい。さらに、分量の関係から、以下の表中ではCDMPPFDとODMPPFDの平均値の多重比較結果のみを示し、樹冠形状値に対する相関係数については必要に応じて文中に引用した。

棚状連続体 (Aw) Aw内における多重比較結果を第3表に示した。CDMPPFDは一部を除いて多くの樹冠形で400を大きく超え、水平棚 (A01w) で最も大きく、次いで、東から見た場合の波線棚 (A31w)、南から見た場合のV字棚 (A26w)、東から見た場合の双曲線棚 (A05w)、南から見た場合の逆V字棚 (A27w)、西から見た場合のL字棚 (A04w)、東から見た場合の三つ山棚 (A29w) などが大きかった。ODMPPFDは東から見た場合の逆V字棚 (A16w) で最も大きく、次いで東から見た場合のV字棚 (A15w)、南から見た場合の波線棚 (A32w)、南から見た場合の二本垂直線棚 (A39w) などが大きかった。CDMPPFDに対し、LAO ($r = 0.785^{***}$)、TPVD ($r = -0.785^{***}$)、LAIC ($r = -0.770^{***}$)、MCFVD ($r = -0.771^{***}$) などには高い相関が認められたが、ODMPPFDに対しては、これらの形状値の相関は少し低下した。

晴天日に限り、東から見た場合の右上がり斜線棚 (A02w) は水平棚 (A01w) と同様に単調な形状で、同一樹冠内には自らの陰部分はできにくい。ただし、斜線棚では樹列 (南北方向) における北側隣接樹に陰を落とす分だけDMPPFDが減少したものと考えられる。同様なことが、V字棚で東から見た場合 (A15w) と南から見た場合 (A26w) の関係、逆V字棚で東から見た場合 (A16w) と南から見た場合 (A27w) の関係にも当てはまると考えられる。なお、垂直棚 (A03w, A38w, A39w) のLAICが他の樹冠形に比べ著しく大きく、このためかCDMPPFDが大きく減少したものと考えられる。

単純回転体状連続体 (Bz) Bz内における多重比較結果を第3表に示した。CDMPPFDは東西に横たわった円柱台 (B02z) や南北に横たわった円柱台 (B03z) で大きく、400を超え、ODMPPFDは東西に横たわった円柱台 (B02z)、南北に横たわった円柱台 (B03z) および直立円柱 (B01z) で大きかった。CDMPPFDに対し、LAO ($r = 0.906^{***}$)、TPVD ($r = -0.906^{***}$)、LAIC ($r = -$

0.864^{***})、TP3D ($r = -0.815^{***}$) などには高い相関が認められ、ODMPPFDに対し、TP3D ($r = -0.967^{***}$)、MCFVD ($r = -0.852^{***}$)、PSLB ($r = 0.804^{***}$) などには高い相関が認められた。

中空化した単純回転体状連続体 (Bt) Bt内における多重比較結果を第3表に示した。CDMPPFDは東西に横たわった円柱台 (B02t) や南北に横たわった円柱台 (B03t) で大きく、400を超え、ODMPPFDは東西に横たわった円柱台 (B02t) および南北に横たわった円柱台 (B03t) で大きかった。CDMPPFDに対し、LAO ($r = 0.916^{***}$)、TPVD ($r = -0.734^{**}$)、LAIC ($r = -0.717^{**}$)、TP3D ($r = -0.814^{***}$) などには高い相関が認められた。また、ODMPPFDに対し、TP3D ($r = -0.963^{***}$)、PSLB ($r = 0.787^{***}$)、PNLES ($r = -0.775^{**}$) などには高い相関が認められた。

単純な非回転体状連続体 (Cz) Cz内における多重比較結果を第3表に示した。CDMPPFDは直方体 (C01z) 以外で全て400以下に分布し、ODMPPFDは直方体 (C01z)、東西方向横倒し三角柱 (C07z) で大きかった。CDMPPFDに対し、LAO ($r = 0.920^{***}$)、TPVD ($r = -0.920^{***}$)、LAIC ($r = -0.891^{***}$)、TP3D ($r = -0.890^{***}$)、MCFVD ($r = -0.839^{***}$) などには高い相関が認められた。ODMPPFDに対し、TP3D ($r = -0.919^{***}$)、MCFVD ($r = -0.847^{***}$) などには高い相関が認められた。

中空化した単純な非回転体状連続体 (Ct) Ct内における多重比較結果を第3表に示した。CDMPPFDは直方体 (C01t) や東西縦長直方体 (C02t) で大きく、ODMPPFDは直方体 (C01t) や東西方向横倒し三角柱 (C07t) で大きかった。CDMPPFDに対し、LAO ($r = 0.889^{***}$)、TPVD ($r = -0.889^{***}$)、LAIC ($r = -0.874^{***}$)、TP3D ($r = -0.867^{***}$)、MCFVD ($r = -0.818^{***}$) などには高い相関が認められた。ODMPPFDに対し、TP3D ($r = -0.904^{***}$)、MCFVD ($r = -0.767^{**}$)、MNLBA ($r = -0.810^{***}$) などには高い相関が認められた。

種々の断面形の輪状連続体 (Gz) Gz内における多重比較結果を第3表に示した。CDMPPFDは多くの樹冠形で400以上に分布したが、中でも、葉層断面形が大きさの異なる2種類の上向き斜線状 (G02z)、大きさの異なる2種類の下向き斜線状 (G04z) および水平矩形状 (G28z) の輪状連続体で大きかった。ODMPPFDも多くの樹冠形で165以上に分布し、中でも、葉層断面形が水平矩形状 (G28z) や大きさの異なる2種類の上向き斜線状 (G02z)

Table 3 Comparisons of CDMPPFDs and ODMPPFDs in several types of canopy shape. n=5.

Aw type	CDM PPFD	ODM PPFD	Gz type	CDM PPFD	ODM PPFD	Ct type	CDM PPFD	ODM PPFD	Hx type	CDM PPFD	ODM PPFD
A01w	480.4 a ^z	171.9 abcd	G02z	441.1 a	170.9 b	C01t	409.9 a	169.4 a	H55z	421.1 a	165.5 b
A31w	471.6 ab	164.1 cdefghi	G04z	441.0 a	170.4 bc	C02t	389.8 b	164.2 b	H56z	413.1 b	166.7 a
A26w	469.7 ab	166.7 bcdefg	G28z	437.9 b	173.3 a	C05t	385.4 b	159.3 c	H54z	411.3 b	164.2 cde
A05w	468.3 ab	165.3 bcdefgh	G25z	414.6 c	168.8 de	C07t	384.4 bc	163.7 b	H47z	408.9 c	164.6 c
A27w	464.7 ab	167.9 abcdef	G15z	414.5 c	169.5 cde	C08t	379.3 cd	153.6 d	H43z	408.6 c	163.8 def
A04w	463.2 ab	169.0 abcde	G26z	414.2 c	168.7 e	C11t	377.5 de	154.0 d	H46z	406.9 c	164.6 cd
A29w	461.0 ab	164.6 bcdefghi	G10z	405.0 d	165.6 g	C06t	376.5 de	149.8 e	H44z	406.9 c	164.5 cd
A06w	460.3 ab	159.2 efghij	G03z	404.6 d	161.0 j	C12t	374.9 de	147.6 e	H20z	400.7 d	165.5 b
A32w	454.0 abc	174.3 abc	G01z	404.3 d	162.3 i	C03t0	373.2 e	157.2 c	H42z	397.1 e	161.8 j
A24w	446.7 abcd	165.9 bcdefgh	G12z	402.9 d	165.0 g	C04t	358.0 f	153.3 d	H45z	395.0 f	162.9 gh
A28w	446.6 abcd	161.9 defghi	G11z	400.4 e	166.8 f	C14t	333.7 g	145.4 f	H26z	392.6 g	167.5 a
A16w	446.2 abcd	178.0 a	G30z	398.0 f	168.8 e	C13t	310.4 h	141.9 g	H19z	390.5 h	163.7 ef
A02w	444.7 abcd	160.8 defghi	G21z	393.1 g	169.8 cd	C09t	298.5 i	138.8 h	H34z	390.3 h	162.2 hij
A30w	440.8 abcd	171.1 abcd	G22z	391.8 gh	169.8 cd	Qz type	CDM PPFD	ODM PPFD	H18z	387.6 i	161.5 jk
A13w	439.4 abcde	165.5 bcdefgh	G23z	390.5 h	158.6 k	Q56z	411.2 a	166.3 a	H33z	385.3 j	162.6 ghi
A33w	433.7 bcdef	153.7 ijk	G29z	385.9 i	165.8 g	Q20z	400.6 b	164.5 b	H25z	383.6 jk	162.0 ij
A25w	433.0 bcdef	155.4 hijk	G05z	382.4 j	169.4 de	Q47z	400.4 b	165.1 b	H35z	382.5 k	163.2 fg
A17w	430.9 bcdef	157.7 fghijk	G07z	368.6 k	165.4 g	Q44z	399.1 b	165.3 b	H24z	377.8 l	160.9 kl
A18w	429.7 bcdef	155.9 ghijk	G27z	363.2 l	163.8 h	Q42z	381.8 c	164.7 b	H50z	377.8 l	164.9 bc
A07w	426.4 bcdefg	159.6 efghij	Ez type	CDM PPFD	ODM PPFD	Q35z	380.7 c	162.4 c	H49z	377.6 l	163.2 fg
A19w	426.2 bcdefg	168.0 abcdef	E11z	424.1 a	166.6 a	Q26z	374.4 d	165.3 b	H48z	373.1 m	160.2 l
A34w	412.1 cdefg	147.6 k	E15z	413.5 b	165.1 b	Q54z	371.8 de	160.9 de	H63z	349.9 n	150.9 m
A14w	403.0 defg	158.7 efghij	E16z	410.4 b	164.9 bc	Q45z	371.7 de	161.2 d	H65z	349.4 n	149.0 n
A15w	403.0 defg	175.4 ab	E09z	404.6 c	164.4 bcd	Q50z	369.4 ef	162.4 c	H64z	348.1 n	149.7 n
A38w	394.9 efg	167.6 abcdef	E02z	400.5 d	164.3 bcd	Q19z	367.2 f	160.1 ef	Mz type	CDM PPFD	ODM PPFD
A08w	391.3 fg	171.7 abcd	E14z	399.4 d	164.0 cd	Q18z	366.9 f	158.3 hi	M01z	460.9 a	164.0 d
A36w	388.6 fg	149.4 jk	E07z	399.3 d	157.5 h	Q43z	361.3 g	158.0 hi	M02z	456.7 b	164.1 d
A35w	383.5 g	163.6 cdefghi	E05z	398.4 d	158.7 g	Q46z	360.8 g	159.6 fg	M03z	443.6 c	176.0 a
A39w	323.0 h	173.1 abc	E04z	389.6 e	161.1 ef	Q33z	355.2 h	159.9 f	M36z	439.5 d	160.5 e
A03w	295.0 h	146.7 k	E13z	388.2 e	164.1 bcd	Q55z	346.5 i	158.7 gh	M31z	438.0 de	159.0 f
Bz type	CDM PPFD	ODM PPFD	E18z	382.3 f	164.0 cd	Q48z	334.6 j	154.8 k	M32z	436.4 e	157.0 gh
B02z	407.6 a	169.5 a	E12z	381.8 f	163.9 cd	Q49z	329.3 k	157.5 i	M30z	435.4 e	163.8 d
B03z	404.7 a	163.8 b	E17z	379.6 f	164.7 bcd	Q24z	327.1 kl	155.9 j	M33z	430.3 f	157.2 gh
B01z	391.9 b	163.8 b	E01z	374.8 g	155.7 i	Q34z	324.5 l	151.2 m	M34z	430.3 f	153.7 j
B04z	377.1 c	158.0 c	E06z	373.2 g	161.4 e	Q65z	321.3 m	153.6 l	M29z	425.8 g	155.7 i
B14z	376.6 cd	158.5 c	E20z	366.0 h	163.7 d	Q25z	315.6 n	154.1 kl	M04z	417.5 h	166.3 c
B13z	376.1 cd	155.2 d	E21z	363.8 h	163.9 cd	Q63z	301.0 o	144.3 o	M05z	414.4 hi	156.5 hi
B08z	371.5 d	153.9 d	E03z	358.0 i	161.7 e	Q64z	290.2 p	146.2 n	M26z	412.1 i	148.0 m
B10z	355.5 e	150.5 e	E22z	351.6 j	164.3 bcd	Bt type	CDM PPFD	ODM PPFD	M37z	408.6 j	167.6 b
B12z	355.3 e	127.2 k	E10z	335.5 k	160.1 f	B02t	407.5 a	170.0 a	M17z	395.6 k	160.5 e
B09z	355.1 e	147.9 f	Iz type	CDM PPFD	ODM PPFD	B03t	405.0 a	164.1 b	M28z	395.2 k	158.5 f
B11z	355.0 e	137.8 i	I01z	467.0 a	184.1 a	B01t	386.1 b	158.3 c	M27z	394.2 k	154.2 j
B05z	343.8 f	143.5 g	I05z	436.5 b	169.9 c	B13t	377.4 c	156.2 de	M24z	393.8 k	150.9 l
B06z	339.7 f	140.9 h	I03z	426.6 c	174.8 b	B14t	376.8 c	159.0 c	M22z	388.5 l	151.1 l
B07z	295.3 g	134.8 j	I04z	425.0 c	170.7 c	B04t	376.5 c	157.9 cd	M09z	386.2 l	157.2 gh
Cz type	CDM PPFD	ODM PPFD	I02z	422.5 c	166.8 d	B08t	373.0 c	154.5 e	M19z	378.9 m	151.3 kl
C01z	409.7 a	169.4 a	I15z	404.3 d	163.6 e	B11t	355.9 d	138.0 j	M20z	377.5 m	152.0 k
C07z	387.5 b	163.1 b	I14z	402.5 d	166.4 d	B09t	353.7 d	147.5 g	M18z	365.8 n	151.5 kl
C05z	384.6 b	158.2 c	I12z	385.1 e	157.8 f	B10t	353.0 d	149.6 f	M21z	358.1 o	157.4 g
C08z	379.3 c	153.9 d	I10z	381.4 ef	158.0 f	B12t	352.3 d	126.7 l	M16z	328.3 p	148.1 m
C11z	378.1 cd	153.5 d	I09z	380.9 ef	157.6 f	B05t	343.1 e	143.4 h	M15z	285.6 q	129.4 n
C06z	377.0 cde	149.8 e	I06z	378.4 f	158.8 f	B06t	337.6 e	140.5 i	M08z	283.1 q	128.7 n
C03z	373.5 de	157.0 c	I08z	360.6 g	150.9 g	B07t	295.2 f	134.7 k	M06z	271.3 r	122.9 o
C12z	372.3 e	147.4 f	I11z	358.5 gh	150.6 g				M07z	268.8 r	123.7 o
C04z	358.1 f	152.9 d	I07z	355.9 h	150.9 g						
C14z	330.1 g	145.1 g	I13z	309.4 i	140.2 h						
C13z	310.7 h	142.1 h									
C10z	305.1 i	127.4 j									
C09z	300.1 i	139.6 i									

^z Different letter indicates significance at 5% level by Turkey's multiple range test.

の輪状連続体で大きかった。CDMPFFDに対し、TPVD ($r = -0.682^{**}$), LAO ($r = 0.682^{**}$), LAIc ($r = -0.653^{**}$), PNLES ($r = 0.577^{**}$) などには相関が認められた。ODMPFFDに対し、MNLBA ($r = -0.700^{***}$), MCT3D ($r = -0.700^{***}$), PNLES ($r = 0.628^{**}$), TP3D ($r = 0.685^{**}$) などに相関が認められた。

種々の断面形のらせん状連続体 (Ez) Ez内における多重比較結果を第3表に示した。CDMPFFDのほとんどが350以上に分布し、中でも葉層断面形が水平矩形状 (E11z), 下側に凸の小さい2分の1円弧状 (E15z) および上側に凸の小さい2分の1円弧 (E16z) で大きかった。ODMPFFDもほとんどが160以上に狭く分布し、中でも、葉層断面形が水平矩形状 (E11z) や下側に凸の小さい2分の1円弧状 (E15z) で大きかった。CDMPFFDに対し、TPVD ($r = -0.862^{***}$), LAO ($r = 0.862^{***}$), LAIc ($r = -0.800^{***}$), MCTD ($r = -0.702^{***}$) などには高い相関が認められた。ただし、ODMPFFDに対して有意な相関を有する樹冠形状値ほとんど無かった。その理由として、分布幅が狭かったことが考えられる。

配置方角を段ごとずらさない種々の単位葉層の輪状散在体 (Qz) Qz内における多重比較結果を第3表に示した。CDMPFFDはほとんどの樹冠形で400以下に分布し、単位葉層が斜め三角形板状の72度間隔 (Q56z), 枝分かれした斜面状の72度間隔 (Q20z) および上側に凸の半円柱面状の72度間隔 (Q47z) などでも大きかった。ODMPFFDは単位葉層が斜め三角形の72度間隔 (Q56z) や斜め六角形板状の72度間隔 (Q26z) などでも大きかった。CDMPFFDに対し、TPVD ($r = -0.814^{***}$), LAIc ($r = -0.812^{***}$), MCT3D ($r = 0.797^{***}$), PNLES ($r = 0.726^{***}$) などに有意な相関が認められた。ODMPFFDに対し、TPVD ($r = -0.732^{***}$), LAIc ($r = -0.731^{***}$), MCT3D ($r = 0.712^{***}$), PNLES ($r = 0.701^{***}$) などに有意な相関が認められた。

配置方角を段ごとずらした種々の単位葉層の輪状散在体 (Hz) Hz内における多重比較結果を第3表に示した。CDMPFFDは単位葉層が斜め三角形の120度間隔 (H55z), 72度間隔 (H56z) および90度間隔 (H54z) などでも大きかった。ODMPFFDは単位葉層が斜め六角形板状の72度間隔 (H26z), 斜め三角形板状の72度間隔 (H56z) で大きかった。CDMPFFDに対し、LAO ($r = 0.740^{***}$), TPVD ($r = -0.740^{***}$), MCFVD ($r = -0.725^{***}$) などに相関が認められた。ODMPFFDとMCT3D ($r = 0.668^{***}$) の相

関も認められた。

配置方角を段ごとずらした種々の単位葉層の傾きが乱雑な輪状散在体 (Sz) Sz内における多重比較結果を第5表に示した。CDMPFFDは単位葉層が下側に凸の半円柱面状の72度間隔 (S44z) と120度間隔 (S43z) および枝分かれした斜面状の90度間隔 (S18z) などでも大きかった。ODMPFFDは単位葉層が半球面状の90度間隔 (S33z), 叢状の120度間隔 (S49z) などでも大きかった。CDMPFFDに対し、MNLBA ($r = -0.864^{***}$), MCFVD ($r = -0.851^{***}$), LAO ($r = 0.719^{***}$), TPVD ($r = -0.819^{***}$), LAIc ($r = -0.702^{***}$), TP3D ($r = -0.704^{***}$) などに相関が認められた。ODMPFFDに対し、PSLB ($r = 0.928^{***}$), PNLES ($r = -0.901^{***}$), MCFVD ($r = -0.805^{***}$), MNLBA ($r = 0.780^{***}$), MCT3D ($r = 0.675^{***}$) などに相関が認められた。

配置方角を段ごとずらした種々の単位葉層の大きさが乱雑な輪状散在体 (Vz) Vz内における多重比較結果を第4表に示した。CDMPFFDは単位葉層が三角形板状の90度間隔 (V54z) と72度間隔 (V56z) などでも大きく、ODMPFFDは広く分布し、単位葉層が三角形板状の90度間隔 (V54z), 枝分かれした斜面状の90度間隔 (V18z) などでも大きかった。CDMPFFDに対し、LAO ($r = 0.834^{***}$), TPVD ($r = -0.834^{***}$), MNLBA ($r = -0.749^{***}$), LAIc ($r = -0.730^{***}$), MCFVD ($r = -0.723^{***}$) などに有意な相関が認められた。ODMPFFDに対し、MCFVD ($r = -0.699^{***}$) に相関も認められた。

配置方角を段ごとずらした種々の単位葉層の傾きと大きさが乱雑な輪状散在体 (Xz) Xz内における多重比較結果を第4表に示した。CDMPFFDは単位葉層が三角形板状の72度間隔 (X56z), 120度間隔 (X55z) および90度間隔 (X55z) などでも大きく、ODMPFFDは単位葉層が六角形板状の72度間隔 (X26z), 三角形板状の90度間隔 (X54z) などでも大きかった。CDMPFFDに対し、MCFVD ($r = -0.869^{***}$), LAIc ($r = -0.844^{***}$), LAO ($r = 0.838^{***}$), TPVD ($r = -0.838^{***}$), MNLBA ($r = -0.809^{***}$) などに高い相関が認められた。ODMPFFDに対し、MCFVD ($r = -0.721^{***}$), MCT3D ($r = 0.712^{***}$) などに相関が認められた。

配置角度間隔をずらさない種々の単位葉層のらせん状散在体 (Fz) Fz内における多重比較結果を第4表に示した。CDMPFFDは単位葉層が斜め三角形板状の144度間隔 (F18z), 上側に凸の半円柱面状の144度間隔 (F48z), 下

側に凸の半円柱面状の144度間隔（F45z）などで大きかった。ODMPPFDは単位葉層が斜め三角形板状の144度間隔（F18z）、斜め六角形板状の144度間隔（F24z）などで大きかった。CDMPPFDに対し、TPVD（ $r = -0.835^{***}$ ）、LAO（ $r = 0.835^{***}$ ）、LAIc（ $r = -0.798^{***}$ ）などに相関が認められた。ODMPPFDに対し、MCFVD（ $r = -0.616^{**}$ ）、MNLBA（ $r = -0.570^{**}$ ）などに相関が認められた。

配置角度間隔をずらした種々の単位葉層のらせん状散在体（Zz） Zz内における多重比較結果を第4表に示した。CDMPPFDは単位葉層が斜め三角形板状の144度間隔（Z18z）、枝分かれした斜面状の144度間隔（Z15z）、上側に凸の半円柱面状の144度間隔（Z48z）などで大きかった。ODMPPFDは、単位葉層が斜め三角形板状の144度間隔（Z18z）や90度間隔（Z16z）などで大きかった。CDMPPFDに対し、MNLBA（ $r = -0.841^{***}$ ）、MCFVD（ $r = -0.829^{***}$ ）などに高い相関が認められた。ODMPPFDに対し、MNLBA（ $r = -0.848^{***}$ ）、MCFVD（ $r = -0.829^{***}$ ）などに高い相関が認められた。

配置角度間隔をずらした種々単位葉層の傾きが乱雑ならせん状散在体（Tz） Tz内における多重比較結果を第4表に示した。CDMPPFDは単位葉層が三角形板状の144度間隔（T18z）と90度間隔（T16z）および六角形板状の144度間隔（T24z）などで大きく、ODMPPFDは単位葉層が六角形板状の144度間隔（T24z）、六角形板状の90度間隔（T22z）などで大きかった。CDMPPFDに対し、MCFVD（ $r = -0.902^{***}$ ）、LAIc（ $r = -0.828^{***}$ ）、LAO（ $r = 0.820^{***}$ ）、NLBA（ $r = -0.795^{***}$ ）、TP3D（ $r = -0.726^{***}$ ）、PNLES（ $r = -0.696^{***}$ ）、PSLB（ $r = 0.684^{***}$ ）などに高い相関が認められた。ODMPPFDに対し、MCFVD（ $r = -0.793^{***}$ ）、MCT3D（ $r = -0.737^{***}$ ）などに相関が認められた。

配置角度間隔をずらした単位葉層の大きさが乱雑ならせん状散在体（Wz） Wz内における多重比較結果を第4表に示した。CDMPPFDは単位葉層が斜め三角形板状の144度間隔（W18z）と90度間隔（W16z）、上側に凸の半円柱面状の144度間（W48z）などで大きかった。ODMPPFDは単位葉層が斜め六角形板状の144度間（W24z）、斜め三角形板状の144度間隔（W18z）などで大きかった。CDMPPFDに対し、TPVD（ $r = -0.951^{***}$ ）、LAO（ $r = 0.951^{***}$ ）、LAIc（ $r = -0.932^{***}$ ）、MNLBA（ $r = -0.802^{***}$ ）、MCFVD（ $r = -0.797^{***}$ ）、TP3D（ $r = -$

0.754^{***} ）などに高い相関が認められた。ODMPPFDに対し、MCFVD（ $r = -0.810^{***}$ ）、MNLBA（ $r = -0.727^{***}$ ）などに相関が認められた。

配置角度間隔をずらした単位葉層の傾きと大きさが乱雑ならせん状散在体（Yz） Yz内における多重比較結果を第5表に示した。CDMPPFDは単位葉層が三角形板状の144度間隔（Y18z）、上側に凸の半円柱面状の144度間隔（Y18z）などで大きく、ODMPPFDは単位葉層が三角形板状の144度間隔（Y18z）や90度間隔（Y16z）などで大きかった。CDMPPFDに対し、TPVD（ $r = -0.902^{***}$ ）、LAO（ $r = 0.902^{***}$ ）、LAIc（ $r = -0.869^{***}$ ）、MCFVD（ $r = -0.787^{***}$ ）、MNLBA（ $r = -0.716^{***}$ ）などに高い相関が認められた。ODMPPFDに対し、ほとんどの樹冠形状値は有意な相関は見られず、僅かに、MCFVD（ $r = -0.462^*$ ）とMNLBA（ $r = -0.485^*$ ）に相関が認められた。**樹冠中心部からの放射状散在体（Pz）** Pz内における多重比較結果を第4表に示した。CDMPPFDとODMPPFDは単位葉層が小型六角形板状（P14z）などで大きかった。CDMPPFDに対し、ほとんどの樹冠形状値は有意な相関は見られず、僅かに、MCFVD（ $r = -0.699^*$ ）に相関が認められた。ODMPPFDに対し、ほとんどの樹冠形状値は有意な相関は見られず、僅かに、MCT3D（ $r = 0.777^*$ ）に相関が認められた。

樹冠底部からの放射状散在体（Nz） Nz内における多重比較結果を第4表に示した。CDMPPFDは単位葉層が三角形板状（N07z）などで大きく、ODMPPFDは単位葉層が三角形板状（N07z）などで大きかった。CDMPPFDおよびODMPPFDに対し、全樹冠形状値は有意な相関は見られなかった。

大型単位葉層の少数分離散在体（Oz） Oz内における多重比較結果を第4表に示した。CDMPPFDは斜め大型楕円板状単位葉層4個で下段が南北の場合（O25z）と東西の場合（O26z）、斜め大型楕円板状単位葉層5個（O37z）などで大きかった。ODMPPFDは斜め大型楕円板状単位葉層4個で下段が東西の場合（O26z）と南北の場合（O25z）などで大きかった。CDMPPFDに対し、LAIc（ $r = -0.907^{***}$ ）、TPVD（ $r = -0.899^{***}$ ）、LAO（ $r = 0.899^{***}$ ）、PNLES（ $r = -0.893^{***}$ ）、PSLB（ $r = 0.885^{***}$ ）などに高い相関が認められた。ODMPPFDに対し、LAIc（ $r = -0.814^{***}$ ）、TPVD（ $r = -0.799^{***}$ ）、LAO（ $r = 0.799^{***}$ ）などに相関が認められた。

異なる樹冠形を上下組み合わせた樹冠形（Iz） Iz内にお

Table 4 Comparisons of CDMPPFDs and ODMPPFDs in several types of canopy shape. n=5.

Vz	CDM	ODM	Fz	CDM	ODM	Tz	CDM	ODM	Kz	CDM	ODM								
type	PPFD	PPFD	type	PPFD	PPFD	type	PPFD	PPFD	type	PPFD	PPFD								
V54z	429.7	a ^z	167.9	a	F18z	413.0	a	166.0	a	T18z	400.8	a	161.2	c	K01z	410.0	a	169.4	b
V56z	421.8	b	164.2	fg	F48z	400.9	b	162.9	b	T16z	387.1	b	161.1	c	K02z	409.3	a	169.7	a
V18z	413.7	c	166.6	b	F45z	397.2	c	161.0	c	T24z	385.8	b	165.2	a	K03z	409.2	a	169.3	b
V47z	413.3	c	163.9	g	F13z	394.6	d	160.5	d	T48z	382.7	c	158.1	f	K09z	406.9	b	169.0	c
V55z	412.3	c	162.5	hi	F15z	393.5	d	159.7	ef	T45z	382.6	c	160.7	d	K04z	405.9	c	164.7	g
V20z	411.6	c	165.6	cd	F14z	385.5	e	159.1	g	T33z	381.6	cd	155.6	j	K08z	405.5	c	167.2	d
V46z	405.9	d	162.6	h	F46z	379.7	f	161.2	c	T13z	380.6	de	157.2	g	K05z	404.0	d	165.8	e
V19z	401.7	e	164.7	def	F16z	379.5	f	160.1	de	T14z	379.4	ef	157.5	g	K06z	403.9	d	165.2	f
V43z	399.8	e	161.7	ij	F43z	378.6	f	159.2	fg	T46z	379.4	ef	159.1	e	K07z	400.6	e	165.7	e
V42z	393.4	f	160.3	k	F51z	372.2	g	160.6	d	T43z	378.6	f	159.1	e	K14z	395.0	f	163.8	i
V44z	390.0	g	160.7	k	F24z	368.7	h	163.2	b	T15z	376.7	g	156.3	i	K15z	394.5	f	164.4	h
V45z	388.8	g	165.9	bc	F31z	368.4	h	157.5	h	T51z	372.9	h	158.1	f	K13z	391.9	g	167.2	d
V26z	385.6	h	165.3	cde	F33z	363.5	i	154.3	m	T44z	369.7	i	156.7	hi	K11z	391.0	gh	164.4	h
V35z	382.2	i	164.6	efg	F32z	358.8	j	156.8	ij	T22z	369.4	ij	162.2	b	K10z	390.7	h	164.3	h
V25z	379.6	j	162.9	h	F47z	356.8	k	159.1	g	T31z	368.8	ij	155.0	k	K17z	377.5	i	158.9	l
V34z	375.1	k	162.4	hi	F44z	353.1	l	157.2	hi	T47z	368.2	j	156.4	hi	K18z	365.2	j	159.5	k
V33z	365.0	l	160.9	jk	F17z	351.9	l	160.0	e	T17z	365.1	k	156.7	h	K16z	361.4	k	160.4	j
V50z	362.9	l	157.5	l	F49z	336.3	m	155.8	k	T32z	363.0	l	155.0	k					
V49z	350.1	m	155.3	m	F22z	330.5	n	156.7	j	T49z	362.4	l	157.4	g					
V63z	342.7	n	147.4	o	F12z	326.8	o	146.7	n	T12z	358.4	m	149.4	m					
V64z	337.5	o	145.7	p	F50z	324.6	p	155.3	l	T50z	353.5	n	153.7	l					
V24z	336.8	o	158.3	l	F23z	313.3	q	155.3	l	T23z	353.2	n	159.2	e					
V48z	332.3	p	152.9	n	F10z	311.0	r	144.2	o	T10z	330.2	o	144.3	o					
V65z	329.5	q	142.9	q	F11z	295.0	s	142.7	p	T11z	326.4	p	145.4	n					
Xz	CDM	ODM	Zz	CDM	ODM	Wz	CDM	ODM	Oz	CDM	ODM								
type	PPFD	PPFD	type	PPFD	PPFD	type	PPFD	PPFD	type	PPFD	PPFD								
X56z	407.3	a	159.2	cd	Z18z	408.9	a	166.0	a	W18z	408.1	a	164.3	b	O25z	435.8	a	165.2	b
X55z	404.9	ab	157.1	f	Z15z	395.8	b	161.6	f	W16z	399.4	b	163.2	c	O26z	430.4	b	167.5	a
X54z	402.9	b	160.6	b	Z48z	392.3	c	163.0	d	W48z	396.6	c	162.5	d	O37z	417.4	c	161.8	e
X26z	399.5	c	165.1	a	Z45z	391.8	c	162.6	de	W16z	391.3	d	161.3	e	O38z	416.2	c	162.9	d
X25z	390.0	d	158.8	d	Z13z	391.4	c	160.6	h	W45z	383.7	e	160.9	e	O01z	402.8	d	156.1	i
X47z	386.9	e	155.9	g	Z51z	387.7	d	161.4	fg	W33z	383.1	e	156.5	i	O36z	399.2	e	160.4	f
X46z	384.4	e	154.7	h	Z16z	387.5	d	165.0	b	W31z	379.8	f	159.6	f	O24z	397.3	ef	164.0	c
X43z	381.3	f	156.1	g	Z14z	385.6	e	159.1	j	W47z	379.5	f	159.0	g	O23z	396.8	f	162.1	e
X44z	378.9	fg	154.2	h	Z43z	384.2	ef	162.2	e	W51z	379.1	f	158.9	g	O35z	396.4	f	159.3	g
X42z	376.6	gh	157.5	ef	Z46z	383.7	f	161.0	gh	W17z	374.9	g	157.9	h	O14z	395.5	f	159.0	g
X45z	374.6	hi	153.0	i	Z17z	374.3	g	162.4	e	W24z	371.4	h	165.9	a	O02z	391.2	g	154.7	j
X35z	373.2	i	159.6	c	Z24z	371.7	h	164.0	c	W43z	369.2	i	158.0	h	O13z	390.8	g	160.2	f
X20z	368.6	j	150.7	j	Z33z	371.2	hi	155.6	m	W32z	367.8	i	158.2	h	O47z	390.4	g	155.9	i
X18z	368.2	j	150.2	j	Z31z	369.7	ij	157.4	k	W11z	361.7	j	158.3	h	O11z	382.2	h	160.6	f
X24z	366.3	jk	158.1	e	Z47z	369.5	j	158.9	j	W12z	361.1	j	155.5	j	O48z	382.1	h	156.7	h
X33z	365.5	k	159.5	cd	Z44z	368.3	jk	157.7	k	W44z	355.7	k	154.6	k	O32z	373.5	i	152.6	k
X34z	359.2	l	154.9	h	Z32z	366.8	k	156.4	l	W49z	354.8	k	153.5	l	O20z	372.4	i	152.6	k
X19z	359.0	l	148.6	k	Z49z	361.6	l	159.0	j	W15z	352.7	l	148.3	o	O19z	370.4	j	152.4	k
X49z	351.2	m	150.2	j	Z12z	352.7	m	148.7	n	W50z	349.8	m	155.7	j	O31z	369.9	j	151.6	l
X50z	348.2	n	153.3	i	Z50z	351.8	mn	156.4	l	W22z	349.5	m	160.0	f	O12z	366.4	k	149.6	mn
X63z	329.3	o	142.3	m	Z22z	350.6	n	160.0	i	W13z	343.6	n	149.6	n	O44z	361.2	l	150.1	m
X48z	327.8	o	145.7	l	Z23z	332.2	o	156.6	l	W23z	341.9	o	158.9	g	O43z	360.2	l	147.1	o
X65z	322.4	p	140.5	n	Z11z	326.8	p	144.3	o	W14z	341.7	o	148.5	o	O07z	348.1	m	149.6	n
X64z	320.4	p	137.8	o	Z10z	325.6	p	143.4	p	W10z	318.5	p	153.0	m	O08z	332.1	n	142.4	p
Pz	CDM	ODM	Nz	CDM	ODM	It	CDM	ODM	Rz	CDM	ODM								
type	PPFD	PPFD	type	PPFD	PPFD	type	PPFD	PPFD	type	PPFD	PPFD								
P14z	404.6	a	166.0	a	N07z	396.1	a	166.1	a	I15t	406.3	a	164.5	b	R27z	426.1	a	172.9	a
P07z	390.7	b	156.4	b	N12z	380.5	b	160.8	c	I14t	403.3	a	166.9	a	R21z	415.2	b	169.0	bc
P18t	363.6	c	148.1	f	N08z	379.4	b	158.6	e	I12t	386.4	b	158.1	cd	R22z	397.8	c	167.1	d
P17z	363.4	c	150.3	d	N19z	377.8	c	156.7	g	I09t	381.9	b	158.2	cd	R09z	396.6	cd	165.8	e
P01z	361.8	c	153.1	c	N13z	375.4	d	162.2	b	I10t	381.7	b	157.2	d	R19z	394.2	d	169.3	b
P13z	359.5	d	153.3	c	N01z	372.0	e	156.1	h	I06t	380.8	b	159.4	c	R28z	385.4	e	162.9	g
P04z	354.1	e	150.3	d	N18z	368.6	f	159.0	d	I11t	360.1	c	151.0	e	R12z	385.3	e	163.2	g
P08z	352.4	e	148.6	e	N04z	365.3	g	157.2	f	I08t	359.1	c	150.8	e	R10z	384.8	e	168.7	bc
P12z	345.2	f	148.9	e						I07t	357.9	c	151.9	e	R18z	383.7	ef	158.5	j
										I13t	308.7	d	139.9	f	R15z	381.9	f	168.2	c
															R24z	375.6	g	161.3	h
															R17z	372.4	h	166.7	de
															R20z	371.6	h	161.6	h
															R25z	364.1	i	160.0	i
															R23z	354.1	j	156.2	k
															R26z	351.1	k	154.7	l
															R11z	343.7	l	164.2	f

^z Different letter indicates significance at 5% level by Turkey's multiple range test.

Table 5 Comparisons of CDMPPFDs and ODMPPFDs in several types of canopy shape. n=5.

Yz	CDM	ODM	Sz	CDM	ODM	Lz	CDM	ODM	Uz	CDM	ODM
type	PPFD	PPFD	type	PPFD	PPFD	type	PPFD	PPFD	type	PPFD	PPFD
Y18z	405.5	a ^z	S44z	394.1	a	L01z	335.9	a	U20z	427.8	a
Y48z	388.4	b	S43z	393.8	a	L11z	328.3	b	U19z	411.8	b
Y16z	386.7	c	S18z	391.0	b	L02z	322.0	c	U16z	409.4	bc
Y24z	382.4	d	S56z	390.9	b	L04z	319.8	cd	U18z	407.2	c
Y15z	379.0	e	S54z	389.6	bc	L12z	318.6	d	U15z	402.2	d
Y17z	374.7	f	S50z	388.8	cd	L14z	314.8	e	U30z	401.4	d
Y31z	372.4	g	S49z	388.2	cde	L03z	309.6	f	U12z	395.5	e
Y14z	372.2	g	S19z	388.2	cde	L13z	303.6	g	U22z	393.0	e
Y46z	370.8	g	S47z	387.1	def	L10z	303.5	g	U17z	385.1	f
Y12z	369.2	h	S46z	386.9	ef	L07z	302.3	g	U21z	346.5	g
Y51z	368.4	hi	S33z	385.9	fg	L05z	302.3	g	Dz	CDM	ODM
Y45z	367.9	hi	S42z	385.3	fgh	L09z	298.6	h	type	PPFD	PPFD
Y33z	367.2	i	S20z	385.0	gh	L15z	297.8	h	D05z	440.8	a
Y13z	365.2	j	S55z	383.7	h	L08z	294.8	i	D28z	402.0	b
Y32z	364.9	jk	S45z	380.9	i	L06z	287.4	j	D23z	400.8	bc
Y11z	364.0	jk	S35z	371.9	j	Jw	CDM	ODM	D10z	399.8	c
Y22z	363.4	k	S48z	371.3	jk	type	PPFD	PPFD	D02z	395.3	d
Y47z	361.3	l	S34z	369.6	k	J03w	458.7	a			
Y23z	356.7	m	S24z	367.2	l	J06w	455.8	b			
Y43z	353.4	n	S26z	364.1	m	J05w	452.8	c			
Y44z	351.6	o	S25z	362.0	n	J01w	451.7	c			
Y49z	350.7	o	S63z	354.1	o	J02w	448.7	d			
Y50z	329.3	p	S64z	352.9	o	J04w	448.5	d			
Y10z	315.8	q	S65z	347.6	p	J08w	421.2	e			
						J07w	417.1	f			

^z Different letter indicates significance at 5% level by Turkey's multiple range test.

ける多重比較結果を第3表に示した. CDMPPFDは下部が水平棚で上部が垂直棒散在 (I01z), 下部がV字棚 (南から見た場合) で上部が垂直棒散在 (I05z) などで大きかった. ODMPPFDは下部が水平棚で上部が垂直棒散在 (I01z), 下部がV字棚 (東から見た場合) で上部が垂直棒散在 (I03z) などで大きかった. CDMPPFDに対し, LAO ($r = 0.970^{***}$), LAIc ($r = -0.967^{***}$), TPVD ($r = -0.959^{***}$), MCTVD ($r = -0.931^{***}$), MCT3D ($r = 0.834^{***}$) などに高い相関が認められた. ODMPPFDに対し, LAO ($r = 0.957^{***}$), TPVD ($r = -0.950^{***}$), LAIc ($r = -0.937^{***}$), MCT3D ($r = 0.821^{***}$) などに高い相関が認められた.

中空化した異なる樹冠形を上下組み合わせた樹冠形 (It) It内における多重比較結果を第4表に示した. CDMPPFDは下部が倒立四角錐台で上部が四角柱 (I15t), 下部が四角柱で上部が四角錐 (I14t) などで大きく, ODMPPFDは下部が四角柱で上部が四角錐 (I14t), 下部が倒立四角錐台で上部が四角柱 (I14z) などで大きかった. CDMPPFDおよびODMPPFDに対し, ほぼ全ての樹冠形状値に極めて高い相関関係が認められた.

異なる樹冠形の南北組み合わせた樹冠形 (Jw) Jw内における多重比較結果を第5表に示した. CDMPPFDはい

ずれも約410以上に分布し, 南側が水平棚で北側が双曲線棚 (J03w) などで大きかった. ODMPPFDもいずれも約160以上に分布し, 南側が垂直棒散在で北側が双曲線棚 (J08w) などで大きかった. CDMPPFDに対し全ての樹冠形状値に極めて高い相関が認められた. ODMPPFDに対しても多くの樹冠形状値に極めて高い相関が認められた.

細形立体4個からなる樹冠形 (Rz) Rz内における多重比較結果を第4表に示した. CDMPPFDは単位葉層が平面的に枝わかれした立体の多段輪状散在体4個 (R27z), 上向き斜線状の多段輪状散在体4個配置 (R21z) などで大きかった. ODMPPFDは単位葉層が平面的に枝わかれした立体の多段輪状散在体4個 (R27z), 水平線状の多段輪状散在体4個配置 (R19z) などで大きかった. CDMPPFDに対し, MNLBAに有意な相関 ($r = -0.635^*$) が認められたが, 他の樹冠形状値には有意な相関が認められなかった. ODMPPFDに対し, ほとんどの樹冠形状値には有意な相関は認められなかった.

扁平立体2個からなる樹冠形 (Uz) Uz内における多重比較結果を第5表に示した. CDMPPFDは単位葉層が水平板状の多段X字形輪状散在体2個 (U20z) などで大きく,

ODMPPFDは単位葉層が枝わかれした斜面状の多段X字形輪状散在体2個(U30z)などで大きかった。CDMPPFDおよびODMPPFDに対し、全ての樹冠形状値に相関は認められなかった。

CACOAS起源の樹冠形(Lz) Lz内における多重比較結果を第5表に示した。CDMPPFDは約290～約330の狭い領域に分布し、開心形1(L01z)、Y字形1(L11z)などで大きかった。ODMPPFDは約129～約146の狭い領域に分布し、Y字形1(L11z)、Y字形2(L12z)などで大きかった。CDMPPFDに対し、TPVD($r = -0.866^{***}$)、LAIc($r = -0.850^{***}$)などに高い相関が認められた。ODMPPFDに対し、TP3D($r = -0.928^{***}$)、PSLB($r = 0.881^{***}$)、PNLES($r = -0.868^{***}$)などに高い相関が認められた。

その他の特殊な形の樹冠形(Mz) Mz内における多重比較結果を第3表に示した。CDMPPFDは約270～約460と広く分布し、水平棚の一部が小さい半球面状に変形したもの(M01z)、水平棚の一部が中位の半球面状に変形したもの(M02z)、水平棚のところどころに突起を付けたもの(M03z)などで大きかった。ODMPPFDは約120～約170と広く分布し、水平棚のところどころに突起を付けたもの(M03z)、南斜面棚のところどころに突起をつけたもの(M37z)などで大きかった。CDMPPFDおよびODMPPFDに対し、MNLBAとMCT3Dを除く全ての樹冠形状値に高い相関が認められた。

等間隔散在体(Dz) Dz内における多重比較結果を第5表に示した。CDMPPFDは単位葉層が小さい矩形板状(D05z)などで大きく、ODMPPFDは単位葉層が小さい円弧状(D02z)などで大きかった。CDMPPFDに対し、全樹冠形状値は有意な相関が見られなかった。ODMPPFDに対し、ほとんどの樹冠形状値は有意な相関は見られず、僅かに、PNLES($r = -0.961^{**}$)やMCT3D($r = -0.957^{*}$)に高い相関が認められた。

無作為的散在体(Kz) Kz内における多重比較結果を第4表に示した。CDMPPFDとODMPPFDとも単位葉層が単一葉ブロック(K01z, K02z, K03z)などで大きかった。CDMPPFDおよびODMPPFDに対し、MCTVDを除く全ての樹冠形状値に極めて高い相関関係が認められた。

4. 樹冠内葉層分布の3次元構造と光環境の関係

光エネルギー吸収の点で似ていても、樹冠葉層と太陽光発電パネルの違いは何であろうか。太陽光発電パネル

の入射面は通常片面であるのに対し、葉の入射面は両面であり、さらに葉層内には透過光や反射光が生まれ、再吸収される。太陽光発電パネルの光吸収はパネル面の向く方角と傾斜角度に単純に左右されるが、樹冠葉層の光吸収は葉群の傾斜角度分布に加え、葉層分布の3次元構造という複雑な要因に支配される。さらに、投射光の強さと方向(方角と傾き)の時間変化のため、光環境は4次元的に変化する。また、CDMPPFDなどの数値はこの4次元的な変化量の1日としての集計値であった。本報の研究目的は、光環境改善に有利な樹冠形をいきなり考案することではなく、このような複雑性の中から光環境を改善する要因をまず検出し、今後の研究に役立てることである。樹冠形を構築する際、一見現実離れしたような単純な条件を用いた理由は、上記の複雑性を考慮し、光環境改善要因の解析や検出を容易にするためであったことを強調したい。

2. の類型間比較結果および3. の類型内比較結果から、果樹園光環境は樹冠原形の種類の違いに大きく影響されるとともに、同じ類型内でも個々の樹冠を構成する葉層の形状やその分布の仕方などによって大きく影響されることが明らかになった。しかし、2. および3. の結果をもたらす原因を十分解明できたとは言えない。何故ならば、研究対象が上述の4次元的な変化量の集計値であったことから、たとえば、2つの樹冠形におけるCDMPPFDの差をもたらした理由を厳密に解明するためには極めて複雑な思考を余儀なくされるからである。ただし、2. および3. の結果は実験条件を厳密に揃えて行った横並びの比較結果であり、今後の研究に役立つ資料的価値を有すると見なすべきであろう。

ここでは、2. の類型間比較および3. の類型内比較から離れ、528個の全樹冠形データを用いながら、様々な角度からの解析結果を示したい。すなわち、全樹冠形における光環境に対する樹冠形状値の相関、樹冠外形の影響、葉層断面形の影響、単位葉層の形状の影響、単位葉層の散在角度間隔の影響、単位葉層の散在における乱雑さの影響などを比較し、考察したものである。

1) 528個の樹冠形における光環境と樹冠形状値の相関関係

全528樹冠形における光環境関連データおよび樹冠形状値の総当たり相関行列を算出した。ただし、分量の関係から、樹冠形状値については一部に限定し、また、樹

冠形状値間の相関行列部分については省略した（第6表）。全般を通じて、相関はODMPPFDよりCDMPPFDの方が高かった（第6表）。おそらく、樹冠の形状の違いが光環境に及ぼす影響の仕方については、直射光を含む方がより鋭敏に現れたためと考えられる。

CDMPPFDあるいはODMPPFDに対し、LAO、PSLB、MCT3Dなどには正の相関関係が認められ、TPVD、PNLES、MNLBA、TP3D、LAIcなどには負の相関が認められた（第6表）。また、CDMCVおよびODMCVに対し、おおよそ上記とは逆の符号の相関が認められた（第6表）。この符号逆転の理由は1. に記した通りである。これらの相関関係から、以下の関係および傾向が推察できた。すなわち、樹冠占有面積（LAO）が大きいほど地面に漏れる光（有効利用できない光）が少ないこと、樹冠表面の葉層の割合（PSLB）が高いほど天空から直接投射する光をより多く受光できること、樹冠3方向の平均厚（MCT3D）が大きいほど割り当て空間いっぱい樹冠が拡がり、葉層の過密と過疎の併存状態が減少することが考えられる。また、樹冠の垂直方向透過度（TPVD）が高いほどLAOは減少するから地面に漏れる光も多くなること（TPVDとLAOの間に $r = -0.985^{***}$ の相関あり）、閉鎖空間内の葉ブロック数割合（PNLES）が高いほどPSLBが減少すること（PNLESとPSLBの間に $r = -0.995^{***}$ の相関あり）、葉塊当たりの葉ブロック数（MNLBA）が多いほど日陰の塊は大きくなること、樹冠3方向の透過度（TP3D）が高いほど葉層の過密と過疎の併存状態が多くなることなどが考えられる。また、LAO、TPVD、TP3D、LAIcなどの影響は晴天日に強く現れ、MCT3D、PNLESなどの影響は曇天日に強く現れた（第6表）。葉量一定の

Table 6 Coefficients of correlation between light environmental data (CDMPPFD, ODMPPFD, CDMCV and ODMCV) in the 528 orchards and several characteristics of canopy shape of the 528 canopies.

	CDM PPFD	ODM PPFD	CDM CV	ODM CV
PSLB	0.3484 *** ^z	0.3863 ***	-0.4037 ***	-0.3756 ***
TPVD	-0.7098 ***	-0.2778 ***	0.5901 ***	-0.0508
LAIc	-0.5336 ***	-0.1583 *	0.3869 ***	-0.1528
PNLES	-0.3244 ***	-0.3530 ***	0.3735 ***	0.3432 ***
MCFVD	-0.3206 ***	-0.2294 ***	0.2498 ***	0.0480
MNLBA	-0.3110 ***	-0.2226 ***	0.2233 ***	0.0074
MCTVD	-0.2976 ***	0.1345 *	0.1837 **	-0.2916 ***
MCT3D	0.2752 ***	0.4693 ***	-0.3609 ***	-0.3823 ***
TP3D	-0.3817 ***	-0.2669 ***	0.3459 ***	0.1654 *
LAO	0.6797 ***	0.2451 ***	-0.5589 ***	0.0759

^z *, ** and *** indicates significance at 5, 1 and 0.1% level, respectively.

Table 7 Comparisons of means of CDMPPFDs, ODMPPFDs, CDMCVs and ODMCVs of the aggregate data from three types (Bz, Cz and Iz) between the different external forms of canopy. n=5.

	CDM PPFD	ODM PPFD	CDM CV	ODM CV
C01z	409.7 a ^z	169.4 a	60.6 a	59.5 a
B02z	407.6 ab	169.5 a	60.8 a	59.1 a
B03z	404.7 ab	163.8 c	61.8 ab	61.1 bc
I15z	404.3 ab	163.6 c	62.7 b	62.5 def
I14z	402.5 b	166.4 b	61.6 ab	59.8 ab
B01z	391.9 c	163.8 c	64.0 c	60.9 bc
C07z	387.5 cd	163.1 c	62.6 b	59.5 a
I12z	385.1 de	157.8 d	66.0 def	64.2 ghi
C05z	384.6 de	158.2 d	67.4 ghi	65.4 ijk
I10z	381.4 ef	158.0 d	67.1 fgh	64.1 ghi
I09z	380.9 ef	157.6 d	67.2 fgh	64.4 hij
C08z	379.3 efg	153.9 fg	64.9 cd	61.9 cde
I06z	378.4 fg	158.8 d	65.7 de	61.7 cd
C11z	378.1 fgh	153.5 fg	65.1 cde	63.2 efgh
B04z	377.1 fghi	158.0 d	66.2 efg	62.0 cde
C06z	377.0 fghi	149.8 hi	70.2 lm	69.6 l
B14z	376.6 fghi	158.5 d	65.7 de	61.2 cd
B13z	376.1 fghi	155.2 ef	68.5 ijk	65.5 jk
C03z	373.5 ghi	157.0 de	67.7 hij	63.0 efg
C12z	372.3 hi	147.4 j	72.2 n	72.4 m
B08z	371.5 i	153.9 fg	68.7 jk	65.1 ijk
I08z	360.6 j	150.9 h	70.4 lm	65.8 k
I11z	358.5 j	150.6 h	70.7 m	66.2 k
C04z	358.1 j	152.9 g	69.5 kl	63.5 fgh
I07z	355.9 j	150.9 h	70.9 m	65.3 ijk
B10z	355.5 j	150.5 h	68.7 jk	62.5 def
B12z	355.3 j	127.2 m	83.2 p	94.6 n
B09z	355.1 j	147.9 ij	73.4 o	69.0 l
B11z	355.0 j	137.8 l	70.2 lm	72.1 m
B05z	343.8 k	143.5 k	71.1 mn	65.2 ijk

^z Different letters indicates significance at 5% level by Tukey's multiple range test.

樹冠の場合、光の透過度が高い樹冠ほど葉層の重なりが多く、結果的に日陰部分が多くなり、逆に透過度が低い樹冠ほど葉層の重なりが少なく、日陰部分が減少することが考えられる。これは、葉量一定という条件を欠いたときにしばしば見られる現象、すなわち、葉量が多すぎて透過度が低くなり、結果的に樹冠が暗くなる現象（過繁茂現象）とは異なることに注意すべきである。

上述のように、光環境関連データと多くの樹冠形状値との間に有意な相関が認められたものの（第6表）、相関係数の絶対値は類型内比較（実験結果の3.）の場合より小さい傾向が見られた。この理由として、樹冠形状値と光環境関連データの相関関係が類型によって大きく異なったためと考えられる。これらの種類のデータを含んだ528樹冠形全体としては相関関係が弱まったものと

Table 8 Comparisons of means of CDMPPFDs, ODMPPFDs, CDMCVs and ODMCVs of the aggregate from the three types (Bt, Ct and It) between the different external forms of canopy. n=5.

	CDM PPFD	ODM PPFD	CDM CV	ODM CV
C01t	409.9 a ^z	169.4 a	60.8 a	59.4 ab
B02t	407.5 ab	170.0 a	60.7 a	58.8 a
I15t	406.3 ab	164.5 c	62.4 bc	62.0 defg
B03t	405.0 ab	164.1 c	61.7 abc	60.8 cd
I14t	403.3 b	166.9 b	61.4 ab	59.6 abc
C02t	389.8 c	164.2 c	64.0 de	60.7 bcd
I12t	386.4 cd	158.1 defg	65.8 fghi	64.1 hijk
B01t	386.1 cd	158.3 defg	67.4 jkl	66.9 m
C05t	385.4 cde	159.3 de	67.1 ijkl	64.8 jkl
C07t	384.4 cde	163.7 c	62.9 cd	59.2 a
I09t	381.9 def	158.2 defg	66.9 hijk	63.8 hij
I10t	381.7 def	157.2 fg	67.1 ijkl	64.3 ijk
I06t	380.8 defg	159.4 d	65.4 fg	61.6 def
C08t	379.3 efgh	153.6 ij	65.2 efg	62.3 efg
C11t	377.5 fghi	154.0 ij	64.9 ef	62.4 efg
B13t	377.4 fghi	156.2 gh	68.1 klm	65.1 kl
B14t	376.8 fghi	159.0 def	65.6 fgh	61.1 de
B04t	376.5 fghi	157.9 defg	66.5 ghij	62.3 efg
C06t	376.5 fghi	149.8 l	70.3 nop	69.5 n
C12t	374.9 ghi	147.6 m	71.8 q	72.3 o
C03t	373.2 hi	157.2 efg	67.6 jkl	62.9 fgh
B08t	373.0 i	154.5 hi	68.3 lm	64.8 jkl
I11t	360.1 j	151.0 kl	70.6 opq	66.0 lm
I08t	359.1 jk	150.8 kl	70.8 pq	66.0 lm
C04t	358.0 jkl	153.3 ij	69.4 mno	63.0 ghi
I07t	357.9 jkl	151.9 jk	70.4 nop	65.0 jkl
B11t	355.9 jkl	138.0 n	70.0 nop	72.1 o
B09t	353.7 kl	147.5 m	73.8 r	69.2 n
B10t	353.0 kl	149.6 lm	69.2 mn	63.0 ghi
B12t	352.3 l	126.7 o	83.8 s	94.9 p

^z Different letters indicates significance at 5% level by Tukey's multiple range test.

考えられる。上記の異なった例として、実験結果の3.に見られたEz, YzおよびPzのODMPPFDに対する樹冠形状値の相関の低さ, NzのCDMPPFDおよびODMPPFDに対する樹冠形状値の相関の低さ, DzやUzの光環境データ全般に対する全樹冠形状値の相関の低さなどがあげられる。とりわけ、光環境が良好であった等間隔散在体(Dz)の相関は特異的に低かった。等間隔散在体の特殊性については8)で考察した。

2) 樹冠外形の違いによる影響

個々の樹冠形の外形が互いに異なった回転体(B)、非回転体(C)およびこれらの上下組み合わせ立体(I)の3者(5反復データ)を合わせたものを対象に、光環境関連データの平均値を比較した。この場合、2種類の葉ブ

Table 9 Comparisons of means of CDMPPFDs, ODMPPFDs, CDMCVs and ODMCVs of the aggregate data from the two types (Gz and Ez) between the different cross sections of foliage (CSFs). The CSFs refer to Fig. 2.

CSFs	n	CDM PPFD	ODM PPFD	CDM CV	ODM CV
CSF19	10	431.0 a ^z	170.0 a	57.8 a	60.4 cdefg
CSF20	10	414.0 ab	167.0 ab	60.2 abc	61.4 efg
CSF17	10	412.3 abc	166.8 abc	60.5 abcd	61.5 fg
CSF10	10	398.4 bcd	166.7 abcd	62.3 bcdefg	61.1 defg
CSF6	10	395.0 bcd	161.3 e	63.3 defgh	63.8 h
CSF2	10	393.0 bcde	163.1 cde	63.3 defgh	62.1 gh
CSF1	10	392.1 cde	162.9 de	63.2 cdefgh	62.0 gh
CSF17	10	386.6 def	164.9 bcde	63.5 efgh	60.0 bcdef
CSF8	10	385.6 defg	165.1 bcde	60.9 bcde	60.2 cdefg
CSF12	10	377.8 defgh	166.8 abc	64.5 fgh	59.4 bcde
CSF9	10	372.0 efgh	163.7 bcde	65.6 h	59.6 bcdef
CSF15	10	367.0 fghi	166.9 abc	65.2 gh	58.1 ab
CSF13	10	364.9 ghi	166.7 abcd	63.9 fgh	59.2 abcd
CSF5	10	361.8 hi	164.8 bcde	59.9 ab	58.4 abc
CSF14	10	349.3 i	161.9 e	61.6 bcdef	57.3 a

^z Different letters indicates significance at 5% level by Tukey's multiple range test.

ロック数調節処理(zとt)ごとと比較した。すなわち、Bz, CzおよびIzの5反復データを用いて、CDMPPFD平均値が上位30位までの樹冠外形に絞り、平均値の多重比較を行った(第7表)。また、Bt, CtおよびItの5反復データを用いて、上記同様に平均値の多重比較を行った(第8表)。その結果、CDMPPFDを基準にすると、z処理の樹冠形群では、外形が直方体、東西に横たわった円柱台、南北に横たわった円柱台、下部が倒立四角錐台で上部が四角柱、下部が四角柱で上部が四角錐台などで光環境が優れ、一方、外形が円錐、双曲線回転体、放物線回転体などで光環境が劣った(第7表)。t処理の樹冠形群でもこれとほぼ似た優劣関係が認められた(第8表)。

3) 葉層断面形の違いによる影響

輪状連続体(Gz)およびらせん状連続体(Ez)のそれぞれ5反復データのうち、同じ葉層断面形を有する樹冠形にグループ化し、葉層断面形グループ間の平均値多重比較を行った(第9表)。その結果、CDMPPFDを基準にすると、葉層断面形が扁平で水平板状のものほど光環境が優れる傾向が推察され、特に、水平矩形状、下側に凸あるいは上側に凸の2分の1円弧などが上位にあった。一方、垂直矩形状、外側下側に凸の4分の1円弧などでは光環境が劣った(第9表)。なお、第9表のCSFについては第2図を参照されたい。

4) 単位葉層の違いによる影響

輪状散在体のQz, Hz, Sz, VzおよびXzのそれぞれ5反復データのうち、同じ単位葉層を有する樹冠形にグループ化し、単位葉層グループ間の平均値多重比較を行った（第10表上）。また、らせん状散在体のZz, Fz, Tz, WzおよびYzのそれぞれ5反復データのうち、同じ単位葉層を有する樹冠形にグループ化し、単位葉層グループ間の平均値多重比較を行った（第10表下）。その結果、CDMPFFDを基準にすると、輪状散在体やらせん状散在体とも全体的に単位葉層が薄い平板状のもののほど光環境が優れ、逆に、厚く複雑なものほど光環境は劣る傾向が推察された。特に、単位葉層が斜め三角形板、凸形の2分の1円柱面状板などは優れ、噴水曲線状や斜め6角形板などは劣った。なお、第10表のUFについては第3図を参照されたい。

5) 配置角度間隔の影響

輪状散在体のQz, Hz, Sz, VzおよびXzのそれぞれ5反復データのうち、同じ回転角度間隔（ β ）を有する樹冠

Table 10 The upper part indicates comparisons of means of CDMPFFDs, ODMPPFDs, CDMCVs and ODMCVs of aggregate data from the five types (Qz, Hz, Sz, Vz and Xz) between different unit foliages (UFs). The lower part indicates comparisons of means of CDMPFFDs, ODMPPFDs, CDMCVs and ODMCVs of aggregate data from the five types (Zz, Fz, Tz, Wz and Yz) between different unit foliages (UFs). The UFs refer to Fig.3.

Ufs	n	CDM PPFD	ODM PPFD	CDM CV	ODM CV
UF7	75	401.2 a ^z	162.9 a	62.4 a	62.8 b
UF5	75	390.2 b	161.4 ab	64.0 ab	62.5 b
UF4	75	389.9 b	161.4 ab	64.2 bc	62.3 b
UF1	75	386.7 b	160.2 b	65.3 bcd	63.2 b
UF3	75	371.1 c	161.3 ab	65.9 cd	60.5 a
UF2	75	368.1 c	161.6 ab	66.2 d	60.6 a
UF6	75	358.8 d	157.9 c	68.3 e	60.7 a
UF8	75	333.1 e	146.0 d	71.0 f	68.5 c

Ufs	n	CDM PPFD	ODM PPFD	CDM CV	ODM CV
UF7	75	387.8 a	161.8 a	64.4 a	62.2 b
UF5	75	380.1 ab	159.4 b	65.8 b	62.6 b
UF1	75	375.8 bc	155.8 c	67.6 c	64.8 e
UF4	75	372.4 bc	158.0 b	67.1 bc	62.8 bc
UF3	75	369.8 c	156.1 c	67.9 cd	63.6 cd
UF6	75	357.0 d	155.5 c	69.2 d	62.2 b
UF2	75	356.0 d	158.5 b	68.2 cd	60.3 a
UF8	75	336.2 e	149.8 d	73.2 e	64.4 de

^z Different letters indicates significance at 5% level by Tukey's multiple range test.

Table 11 The upper part indicates comparisons of means of CDMPFFDs, ODMPPFDs, CDMCVs and ODMCVs of aggregate data from the five types (Qz, Hz, Sz, Vz and Xz) between the different intervals of circulating angle (β s). The lower part indicates comparisons of means of CDMPFFDs, ODMPPFDs, CDMCVs and ODMCVs of aggregate data from the five types (Zz, Fz, Tz, Wz and Yz) between the different intervals of binding angle (γ s).

β (degree)	n	CDM PPFD	ODM PPFD	CDM CV	ODM CV
72	200	382.5 a ^z	160.5 a	65.4 a	62.8 a
120	200	371.5 b	158.2 b	67.0 b	62.7 a
90	200	370.7 b	158.5 b	65.4 a	62.4 a

γ (degree)	n	CDM PPFD	ODM PPFD	CDM CV	ODM CV
144	200	380.3 a	380.3 a	66.1 a	63.2 a
90	200	364.3 b	364.3 b	68.2 b	62.7 a
120	200	356.0 c	356.0 c	69.4 c	62.7 a

^z Different letters indicates significance at 5% level by Tukey's multiple range test.

形にグループ化し、回転角度間隔グループ間の平均値多重比較を行った（第11表上）。また、らせん状散在体のZz, Fz, Tz, WzおよびYzのそれぞれ5反復データのうち、同じ周回角度間隔（ γ ）を有する樹冠形にグループ化し、周回角度間隔グループ間の平均値多重比較を行った（第11表下）。その結果、CDMPFFDを基準にすると、輪状散在体の光環境には回転角度間隔が72度>120度=90度の優劣関係、らせん状散在体の光環境には周回角度間隔が144度>120度>90度の有意な優劣関係が認められた。平均値の差が小さかった理由は、多くの別要因が介在したためで、むしろ有意差が認められたことの意義は大きい。

6) 散在の乱雑さの影響

輪状散在体のQz, Hz, Sz, VzおよびXzのそれぞれ5反復データのうち、単位葉層の散在における乱雑さが同じものにグループ化し、散在の乱雑さグループ間の平均値多重比較を行った（第12表上）。また、らせん状散在体のZz, Fz, Tz, WzおよびYzのそれぞれ5反復データのうち、単位葉層散在における乱雑さが同じものにグループ化し、散在の乱雑さグループ間の平均値多重比較を行った（第12表下）。その結果、CDMPFFDを基準にすると、輪状散在体の光環境には、配置方角がずれる \geq 配置方角がずれて大きさも乱雑 \geq 配置方角がずれて傾きも乱雑 \geq 配置方角がずれて傾きと大きさも乱雑 $>$ 配置方角が同じの優劣関係、らせん状散在体においては配置方角が

Table 12 Comparisons of means of CDMPPFDs, ODMPPFDs, CDMCVs and ODMCVs between the different kinds of randomness of the foliage distribution in the ring scattering types (upper) and that in the spiral scattering types (lower).

Ring scattering types	n	CDM PPFD	ODM PPFD	CDM CV	ODM CV
Deviation in arrangement direction of UF only (Hz type)	120	389.0 a ^z	161.9 a	64.4 a	62.5 b
“Deviation” ^y and randomness in dimension of UF (Vz type)	120	381.7 ab	160.1 ab	65.5 a	63.0 b
“Deviation” and randomness in inclination angle of UF (Sz type)	120	378.3 b	161.2 a	65.8 a	61.3 a
“Deviation” and randomness in both the dimension and inclination angle (Xz type)	120	368.6 c	153.5 c	68.5 b	65.4 c
No “Deviation” and no randomness (Qz type)	120	356.8 d	158.8 b	68.3 b	60.8 a
Spiral scattering types	n	CDM PPFD	ODM PPFD	CDM CV	ODM CV
Deviation in arrangement direction of UF only (Zz type)	120	370.9 a	158.5 a	67.5 a	62.8 ab
“Deviation” and randomness in inclination angle of UF (Tz type)	120	369.9 a	156.7 ab	67.7 a	63.4 bc
“Deviation” and randomness in dimension of UF (Wz type)	120	367.3 ab	157.6 a	67.6 a	62.4 a
“Deviation” and randomness in both the dimension and inclination angle (Yz type)	120	365.9 ab	155.3 b	68.4 a	63.6 c
No “Deviation” and no randomness (Fz type)	120	360.6 b	157.3 a	68.3 a	62.2 a

^z Different letters indicates significance at 5% level by Tukey's multiple range test.^y Deviation in arrangement direction of UF.

ずれる = 配置方角がずれて大きさも乱雑 ≥ 配置方角がずれて傾きも乱雑 = 配置方角がずれて傾きと大きさも乱雑 ≥ 配置方角が同じの優劣関係が認められた。平均値の差が小さかった理由は多くの別要因が介在したためで、むしろ有意差が認められたことの意義は大きい。

7) 果樹園光環境の改善要因に関する一考察

果樹園光環境の改善要因に関する筆者なりの考察を追加したい。要点を簡潔に記すと、割り当て空間の最大利用、日陰部分の減少、光環境の空間的および時間的バランスの3者が重要であると考えられる。

a) 地面に漏れる直射光をできるだけ少なくする（空間の最大利用）

LAOは割り当て土地面積に占める樹冠葉層の垂直方向投影面積の割合であり、LAOが大きいほど地面に漏れる投射光量は少なく、光環境改善にとって有利であると考えられる。また、LAOとCDMPPFDの間の高い正の相関関係は、TPVDとCDMPPFDの間の高い負の相関関係と裏腹の関係にあると考えられる。しかし、太陽光線の向きは垂直方向ではなく、時刻とともに変化する。また、天空からの光は全方向から投射する。斜めからの光を葉層が遮断できなければ、逆に地面に漏れる光量が増えると見なされる。データは省略したが、斜め45度からの透過率とCDMPPFDとの間の高い負の相関関係はこのことを裏付ける。よって、平面だけでなく、空間を最大限利用することが重要であろう。ただし、上記の関係はほとんどの類型で認められたものの、等間隔散在

体（Dz）では当てはまらなかった。等間隔散在体（Dz）の光環境改善効果には上記とは別の要因が大きく作用したものと見なすべきであろう。

b) 葉ブロックへの入射光の強さをできるだけ弱い（露出部分を増やし、日陰部分を減らし、日陰の重複を避ける）

樹冠表面の葉ブロックには外光が直接入射するため、樹冠表面の葉ブロック数の割合（PSLB）が高い樹冠ほど、言い換えれば露出部分が多いほど光環境改善にとって有利であろう。CDMPPFDとODMPPFDの両者ともPSLBに対し有意な正の相関が認められた。しかし、相関係数自体はさほど大きくなかった。また、光環境が比較的良好であった等間隔散在体（Dz）では、PSLBとの相関は全類型中最低であった。この背景には、露出部分が多くても、日陰部分が暗ければ、その効果は半減することが考えられる。樹冠内の陰を大別すると、隣接樹冠からの陰、同一樹冠内の他葉層からの陰および自葉層内の陰が考えられる。隣接樹冠からの陰の多少には主に樹冠の外形が関係し、他葉層からの陰の多少には主に葉層の散在の仕方、各葉層内の陰の多少には主に単位葉層の形状や葉層断面形などが関係するものと考えられる。陰部分の大きさや異なる種類の陰の重なりによって、陰部分の暗さも影響されるだろう。

c) 光環境の空間的バランスと時間的バランスを保つ（葉量分布の過密と過疎の併存を避け、適度な空隙を保つ）

割り当て空間内の葉ブロック数が一定の場合、ある領域で葉ブロックが過密状態になれば、他の領域では過疎状態になる。光環境良好な樹冠形に比べ、慣行の樹形管理法に基づき作られたLzの場合、上記の過密と過疎の併存が目立った。この併存状態は空間の無駄な利用、極度の日陰の発生などの悪影響をもたらすだろう。また、日の出から日没までの間を通じて良好な光環境が保持されることが重要である。一時的に光環境が良好であっても、時刻によって光環境が急に悪化する場合、効果は半減すると考えられる。筆者は、上記の空間的バランスと時間的バランスを保つ要因として、単位葉層が小さくて均一であること、および、単位葉層間に適度な空隙が保持されていることをあげたい。すなわち、小さく、かつ形状が単純な葉層では陰部分も小さくなり、適度な間隔を有した葉層分布は葉層の過密と過疎の併存状態を減らす。また、これらは、時刻によって変化する太陽高度や太陽方位の影響を和らげる。いわば、陰に入っても長続きしない、等間隔散在体(Dz)などに見られた特異現象(多くの樹冠形状値と光環境の良否との相関の低さ)には、上記の空間的バランスおよび時間的バランスが良好に保たれたことが大きく関与しているものと考えられる。また、PSLBの序列の低かったDzでは、適度な空隙の存在により樹冠内部にも樹冠表面部のような強い光が届いたものと考えられる。

5. シミュレーション実験前提条件の変更が光環境良否の序列に及ぼす影響

1) 葉密度分布の違いによる影響

方法で記したように、均一な葉密度分布を弱い不均一分布あるいは強い不均一分布に変えた場合に、光環境の序列がどれほど変化するか検討した。均一分布では葉ブロック当たり葉数が15.28枚均一であったのに対し、弱い不均一分布では葉ブロックの約67%が14.28枚から16.28枚の範囲に分布し、残り33%がこの範囲外に分布した。また、強い不均一分布では葉ブロックの約67%が13.28枚から17.28枚の範囲に分布し、残り33%がこの範囲外に分布した。ただし、正規分布なので、ごく一部の葉ブロックは数枚の葉、あるいは数十枚の葉を含んだ。上記3通りに設定したそれぞれ528個樹冠形を対象にしたシミュレーション実験結果を用い、CDMPPFD、ODMPPFD、CDMCVおよびODMCVのそれぞれについ

て、均一分布と弱い不均一分布の間および均一分布と強い不均一分布の間の回帰直線式を算出した(第13表A)。なお、散布図の1例を第9図Aに示した。その結果、いずれの回帰直線式偏回帰係数は1に近く、決定係数(R^2)も1に近かった(第13表A)。本実験結果から、葉密度分布が不均一であっても光環境の良否の序列はほとんど変わらないものと見なされる。この原因として、葉ブロック間に葉密度の違いが存在したとき、葉数の少ない葉ブロックにより光遮断量が減る一方、葉数の多い葉ブロックにより光遮断量が増え、結局のところ増減相殺することが考えられる。また、この増減場所が樹冠の特定部位に偏ることなく無作為的に分布したため、CDMPPFDなどの日平均値に大きく反映しなかったものと考えられる。また、光環境の良否の序列が隣同志では、両者間の数値差は極めて小さかったことから、なんらかの原因で数値がふれ、序列は変わったとしても、全体として大きく変わることはないものと考えられる。

2) 葉密度レベルの違いの影響

方法で記した3つの葉密度レベル、すなわち、中庸な葉密度、高葉密度および低葉密度におけるシミュレーション実験結果を用い、CDMPPFD、ODMPPFD、CDMCVおよびODMCVのそれぞれについて、中庸な葉密度と高葉密度の間および中庸な葉密度と低葉密度の間の回帰直線式を算出した(第13表Bおよび第9図B)。その結果、低葉密度のODMPPFDとODMCVに対する回帰直線式の決定係数がやや減少したが、低葉密度のCDMPPFDとCDMCVおよび高葉密度の全てにおいて、決定係数は1に近かった(第13表B)。ただし、回帰直線式の切片値は低葉密度の場合に増大し、高葉密度の場合に減少したが、葉密度が高いと暗くなり、葉密度が低いと明るくなる関係から、これは当然のことであった。よって、葉密度が異なっても、光環境の良否の序列はほとんど変わらず、葉ブロックの空間分布の違いこそが光環境の良否に決定的に作用するものと考えられる。

3) グリッドサイズの違いの影響

方法で記した3種類のグリッドのサイズを用いたときのシミュレーション実験結果を用い、CDMPPFD、ODMPPFD、CDMCVおよびODMCVのそれぞれについて、中サイズグリッドと小サイズグリッドの間および中サイズグリッドと大サイズグリッドの間の回帰直線式を

算出した（第13表Cおよび第9図C）。その結果、中サイズグリッドと小サイズグリッドの間のODMPPFDとODMCVで分散が少し増大したものの、他については決定係数が1に近かった（第13表C）。したがって、グリッドサイズが異なっても、光環境の良否の序列はほとんど変わらないものと見なされる。ただし、中サイズグリッドと小サイズグリッドの間における回帰式の切片はプラス値になり、中サイズグリッドと大サイズグリッドの間における回帰式の切片はマイナス値になった。この原因として、グリッドサイズが変わると、樹高も変わり、樹冠厚が変化し、LAIcの数値も変わったことがあげられ、これは当然のことであると考えられる。

4) 樹種品種の違いの影響

リンゴ‘ふじ’と他4品種のシミュレーション実験結果を用い、CDMPPFD、ODMPPFD、CDMCVおよびODMCV

Fig. 9 Part A indicates relations between CDMPPFDs ($\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) from the uniform distribution of leaf density (X) and that from the weakly unequal distribution (Y). Part B indicates relations between CDMPPFDs from the middle leaf density (X) and that from the high leaf density (Y). Part C indicates relations between CDMPPFDs from the middle size of grid (X) and that from the large size of grid (Y). Part D indicates relations between CDMPPFDs from apple ‘Fuji’ (X) and that from pear ‘La France’ (Y).

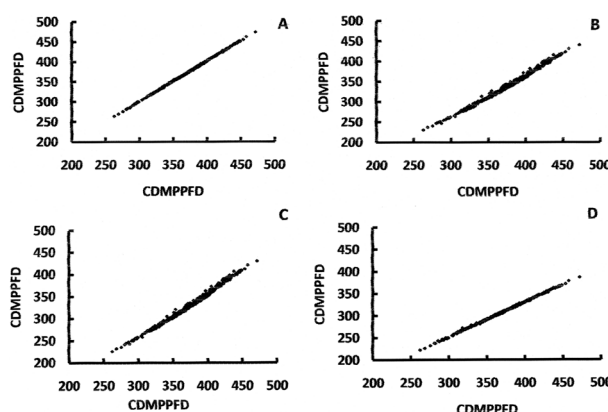


Table 13 Coefficients of determination (R^2) and formulas of regression lines of the simulation results of CDMPPFD, ODMPPFD, CDMCV or ODMCV using the 528 kinds of 3-d array data for leaf block distribution between different assumptions, namely leaf density distribution (A), level of leaf density (B), grid size (C) and cultivars (D).

A	Uniform leaf density distribution (X)		R ²	Uniform leaf density distribution (X)		R ²
	Weak leaf density distribution (Y)			Strong leaf density distribution (Y)		
CDMPPFD	Y=1.014X-4.140	0.999	CDMPPFD	Y=1.01X-3.022	0.999	
ODMPPFD	Y=0.986X-0.017	0.998	ODMPPFD	Y=0.974X+1.039	0.995	
CDMCV	Y=1.013X-1.169	0.999	CDMCV	Y=1.008X-0.934	0.999	
ODMCV	Y=1.010X+0.563	0.988	ODMCV	Y=1.004X+1.384	0.996	
B	Middle level of leaf density (X)		R ²	Middle level of leaf density (X)		R ²
	Low level of leaf density (Y)			High level of leaf density (Y)		
CDMPPFD	Y=0.917X+74.16	0.991	CDMPPFD	Y=1.035X-51.44	0.991	
ODMPPFD	Y=0.803X+42.31	0.915	ODMPPFD	Y=1.006X-21.01	0.976	
CDMCV	Y=0.797X+5.369	0.991	CDMCV	Y=1.179X-4.756	0.991	
ODMCV	Y=0.669X+20.75	0.813	ODMCV	Y=1.278X-10.84	0.978	
C	Middle grid size (X)		R ²	Middle grid size (X)		R ²
	Small grid size (Y)			Large grid size (Y)		
CDMPPFD	Y=0.921X+89.04	0.987	CDMPPFD	Y=1.011X-49.07	0.990	
ODMPPFD	Y=0.809X+50.95	0.902	ODMPPFD	Y=0.94X-17.78	0.970	
CDMCV	Y=0.766X+5.782	0.987	CDMCV	Y=1.172X-4.422	0.991	
ODMCV	Y=0.617X+21.11	0.791	ODMCV	Y=1.28X-7.851	0.987	
D	Fuji (X)		R ²	Fuji (X)		R ²
	La France (Y)			Satohnishiki (Y)		
CDMPPFD	Y=0.787X+16.05	0.998	CDMPPFD	Y=0.953X+0.9503	0.999	
ODMPPFD	Y=0.801X+3.338	0.979	ODMPPFD	Y=0.999X+1.277	0.997	
CDMCV	Y=0.956X+6.997	0.997	CDMCV	Y=0.976+1.405	0.991	
ODMCV	Y=0.984X+7.038	0.979	ODMCV	Y=0.964X-0.67	0.995	
D	Fuji (X)		R ²	Fuji (X)		R ²
	Hiratanenashi (Y)			Tsukuba (Y)		
CDMPPFD	Y=1.071X-34.94	0.997	CDMPPFD	Y=0.974X-4.938	0.999	
ODMPPFD	Y=1.05X-11.43	0.993	ODMPPFD	Y=1.091X-10.32	0.973	
CDMCV	Y=1.098X-4.237	0.998	CDMCV	Y=1.035X-0.178	0.999	
ODMCV	Y=1.109X-6.194	0.989	ODMCV	Y=1.062X-8.953	0.960	

のそれぞれについて、品種間の回帰直線式を算出した（第13表Dおよび第9図D）。その結果、全組み合わせの回帰直線式の決定係数は1に近かった。よって、品種が異なっても、光環境の良否の序列はほとんど変わらないものと見なされる。なお、回帰直線式の偏回帰係数や切片の違いは、OLEAS計算に用いた個葉面積、葉ブロック当たり葉数、様々な光減衰係数に関連したパラメータ値などの品種間の違いからもたらされ、当然の結果である。葉厚、葉色、反射率などの葉の光学的性質、葉の傾斜角度分布、個葉面積や葉ブロック当たり葉数などの品種的差異を通じて、葉面PPFD値に直接影響し、結果的にCDMPPFD、ODMPPFD、CDMCVおよびODMCVの値を変えたものの、OLEASの計算過程は全く同じであり、各樹冠形における葉ブロックの空間分布も全く同じであったことから、序列の逆転現象はほとんど起きなかったものと考えられる。

6. まとめと今後の研究に向けて

本実験の結果、樹冠形の改変によってはCDMPPFDやODMPPFDの増大効果が明瞭に認められた。光合成作用の光飽和現象（山本，2014）を考慮しても、上記増大効果により、ほぼ同等の光合成量の増大効果も期待でき、緒言に記した研究目的に照らして意義深いものと考えられる。ただし、研究目的に照らした場合、まだ多くの課題が残されている。

今後の研究の柱として、①光環境改善要因の一層の解明、②本報の研究成果（光環境改善要因）を生かした樹冠形のさらなる変形処理の効果、③自由度の高い樹冠形の構築を目的としたCACOASの機能拡張、④栽培現場での樹冠形の診断方法の開発（広角レンズカメラを用いた水平および見上げの近接撮影やドローンによる見下ろし撮影）、⑤受光態勢良好な樹冠形の積木構造キットの作製と普及（3Dプリンタの利用）などが考えられる。

摘 要

果樹園光環境の改善要因を見出すため、以下の実験を行った。樹冠の外部形態ならびに葉層分布の内部構造を与える独自の手法として、葉ブロックの積木構造の手法を用いた。原形となる樹冠の形状を棚状、回転体状、非回転体状、輪状、らせん状、分離状、不定形状などに大別した。さらに、輪状とらせん状については、葉プロッ

クが連続するもの（連続体）と分離散在するもの（散在体）に分け、合計29個の樹冠原形の類型を設けた。各類型における葉層の形や配置方法などを変え、さらに、樹冠原形の形状をできるだけ保ちながら葉ブロック数を調整するための3種類の処理を施し、合計528個の多種多様な樹冠形を作成した。これらの樹冠形を対象に、果樹園光環境解析システム（OLEAS）を用いて、7月下旬におけるリンゴ‘ふじ’の果樹園光環境を比較調査した。果樹園光環境の指標として、樹冠内全葉の葉面PPFDの晴天日平均値（CDMPPFD）および曇天日平均値（ODMPPFD）を用いた。また、光環境の均一性の指標として葉面PPFDの毎時分布における変動係数の13時刻（6時から18時までの各時刻）平均値を計算し、晴天日および曇天日の平均変動係数（CDMCVおよびODMCV）とした。このほか多数の樹冠形状値（山本，2015）も算出した。その結果、既報（山本，2015）に比較して、本実験手法で生まれた樹冠の形状の自由度は増大し、晴天日の光環境の変動幅と最大値はともに著しく増大し、曇天日の最大値も増大した。光環境関連データの類型間多重比較を行った結果、CDMPPFDの類型平均値は、異なる樹冠原形の南北組み合わせ、棚状連続体、等間隔散在体などで大きく、CACOAS起源の樹冠形で最も小さかった。また、ODMPPFDの類型平均値は、等間隔散在体、種々葉層断面形の輪状連続体、少数大型立体の分離散在体などで大きく、CACOAS起源の樹冠形、単純回転体状連続体などで小さかった。類型ごと、CDMPPFD、ODMPPFDおよび主たる樹冠形状値について各類型に含まれた樹冠形間の平均値多重比較を行った結果、平均値の分離は良好であり、樹冠内葉層分布の3次元構造の違いを強く反映した光環境の良否に関する情報を数多く入手できた。また、CDMPPFDやODMPPFDと多くの樹冠形状値の間に高い相関が認められた。全528個の樹冠形におけるCDMPPFDやODMPPFDに対し、樹冠占有面積、樹冠表面葉ブロック数割合、3方向の樹冠厚平均値などには正の相関関係が認められ、垂直方向透過度、閉鎖空間内葉ブロック数割合、葉塊当たり葉ブロック数平均値、3方向透過度、樹冠占有面積当たり葉面積指数などには負の相関関係が認められた。また、CDMCVおよびODMCVに対し、おおよそ上記とは逆の符号の相関関係が認められた。全528個の樹冠形の光環境に対する樹冠外形の影響、葉層断面形の影響、単位葉層の影響、単位葉層の散在角度間隔の影響、散在の乱雑さの影響などを比較したところ、それぞれで明瞭

な違いが認められた。上記の光環境良否の序列は葉密度分布、葉密度レベル、グリッドサイズ、樹種・品種などを変えた場合においてもほぼ成立したことから、葉ブロックの空間分布の違いこそが光環境の良否に決定的に作用するものと考えられた。

引用文献

- Barden, J. A. and D. C. Ferree. 1979. Rootstock does not affect net photosynthesis, dark respiration, specific leaf weight, and translocation of apple leaves. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 104:526-528.
- Charles-Edwards, D. A. and M. R. Thorpe. 1976. Interception of diffuse and direct-beam radiation by a hedgerow apple orchards. *Ann. Bot.* 40:603-613.
- FAO. 2000. Food Balance Sheets.
- Ferguson, J. H. A. 1960. A comparison of two planting systems in orchards as regards the amount of radiation intercepted by the tree. *Netherland J. Agr. Sci.* 8:271-280.
- Ferree, D. C. 1978. Cultural factors influencing net photosynthesis of apple trees. *HortScience.* 13:650-652.
- Gergely, I. and G. Erdélyi. 1985. Relationship between water supply and assimilation in apple trees. *Acta Agronomica Academiae Scientiarum Hungaricae.* 34:47-54.
- 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. 蚕糸昆虫研報. 13:1-142.
- Kawamura, K. and Takeda, H. 2004. Rules of crown development in the clonal shrub *Vaccinium hirtum* in a low-light understory: a quantitative analysis of architecture. *Canadian Journal of Botany.* 82:329-339.
- Mize, J. H. and Cox, J. G. 1969. シミュレーションの基礎 (小笠原暁監訳). 培風館. 東京.
- Oikawa, T. 1977. Light regime in relation to plant population geometry. II. Light penetration in a square-planted population. *Bot. Mag. Tokyo.* 90:11-22.
- 小倉金之助・矢野健太郎. 1964. 基礎数学ハンドブック. 森北出版. 東京.
- Palmer, J. W. 1977. Diurnal light interception and a computer model of light interception by hedgerow apple orchards. *J. Appl. Ecol.* 14:601-614.
- Prusinkiewics, P. 1998. Modelling of spatial structure and development of plants: a review. *Sci. Hortic.* 74:113-149.
- 山本隆儀・上田仁悦・小泉弘樹・西澤滝太. 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 (13) : 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 (2) : 343-373.
- 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・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 (4) : 299-306.
- 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.
- 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 (2) : 67-99.
- 山本 強. 1983. The 3 Dimensional Computer・Graphics. CQ出版社. 東京.