

## 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

山本 隆儀

山形大学農学部農業生産学講座  
(平成9年9月1日受理)

Computed Effects of Tree Crown Shape and Canopy Structure  
on Light Environment in an Isolated Tree Crown Possessed  
Almost Identical Leaf Area, Volume and Land Area Occupied

Takanori YAMAMOTO

Section of Agricultural Production, Department of Bioproduction, Faculty of  
Agriculture, Yamagata University, Tsuruoka, 997, Japan  
(Received September 1, 1997)

### Summary

Six hundreds forty modelled crowns with wide-spanned canopy structures were constructed in a computer memory by combining different and simple 32 solid bodies with 20 species of procedures for decreasing the volume. These modelled-crowns were forced to possess almost identical volumes of leaf canopy (VLCs), land areas occupied by leaf canopy (AOLCs) and leaf area indices per AOLC (LAICs) and to have leaf canopy thickness less than 3.15m. The daily means of photosynthetic photon flux density (PPFD) on leaf surfaces (DMPPFDs), the hourly means (HMPPFDs) and their variances of the isolated modelled crowns under a bright sky or an overcast sky in the end of July were estimated by the simulation model (Yamamoto, 1988) using several parameters of an apple 'Fuji'.

1. The means of AOLCs, LAICs and VLCs of the 640 modelled crowns were 5.02m<sup>2</sup>, 3.176 and 6.302m<sup>3</sup>, respectively, and their coefficients of variation (CVs) were about 3%. The CVs of another biometrical data were above 20%, and that of the unavailable volumes (UVs), the mean layer thickness (LTs) and the mean cavity thickness (CTs) were especially large. The CVs of DMPPFDs were 7.35% under a bright sky and 7.65% under an overcast sky. Therefore, the potential to improve the light environment in an isolated crown without changes of AOLC, LAIC and VLC was recognized.

2. The DMPPFDs of the 640 modelled-crowns under the 2 skies possessed highly positive correlations against the volumes of solid bodies before the decreasing procedure (VOLUMEs) and the UVs ( $r=0.6934^{***}$  and  $r=0.6167^{***}$  under a bright sky, or  $r=0.6310^{***}$  and  $r=0.7464^{***}$  under an overcast sky, respectively). The all HMPPFDs possessed negative correlations against the LT values of the vertical direction under the 2 skies. The HMPPFDs possessed negative correlations against the LT values of the east-west direction and the south-north one at all hours under the overcast sky, and only in the morning and evening under the bright sky. The similar analyses against the CT values showed almost opposite correlations. The external surface areas (Ss) of the east direction or the west possessed positive correlations against the all HMPPFDs under an overcast sky, but only in the morning and evening under a bright sky.

3. Effective improvements of light environment were found in some solid bodies such as a cube, an elliptic cylinder or a hemisphere + a circular cylinder. These cubic bodies have larger volumes to be inscribed in a rectangular parallelepiped and capacity to have larger UVs and more scattered leaf layers in the all directions by combining procedures for decreasing volume. Some species of procedures for decreasing the volumes such as empty, removal of 2 horizontal slices, radiated random-removals (upper) + removal of 2 horizontal slices (lower), removal of 3 inverted-pyramidal layers made the LTs large and the CTs small and improved the light environments.

**key words**: tree crown shape, canopy structure, light environment, isolated crown, analysis by computer

キーワード: 樹冠形, 葉群構造, 光環境, 独立樹, コンピュータ解析

## 緒 言

二つの物体、一方は中空な球、他方は“コンペイトー（金平糖）”のような星状物体があるとする。いずれも同量の半透明の資材でできており、直径も等しいとする。両者に同等の光を当てたとき、前者には連続した陰影部分ができ、後者には分散した複雑な形の陰影部分ができる。この場合、資材全体の受光率はどちらが高いか？ 仮にこの資材が無数の半透明の薄板の寄せ集めで、たくさんの空隙をもつならば、薄板の平均受光強度はどちらが高いか？ この疑問を解くことは、とりもなおさず、離散分布型の植被、すなわち、果樹、庭園木、茶あるいは桑などの樹冠内光環境の改善、ひいては樹冠葉群の光合成速度の上昇をもたらす樹冠形や葉群構造を見出すことにつながる（しかも、葉量一定、占有土地面積一定の制約のもとで）。これと似た課題が連続分布型植被の場合にも与えられるが、性格と解決手段の点で異なる。すなわち、植被内放射分布とその関連要因に対して、一方は垂直分布を扱い、他方は空間分布を扱う。また、受光態勢の改良手段が一方は草型改良育種、他方は整枝剪定方法や栽植方式の選択である。

離散分布型の重要作物である果樹においては、適切な結実管理と肥培管理に加えて、樹冠内光環境の改善が、高品質多収の果実生産に不可欠である。このため、樹冠内光環境に密接な栽植方式、台木、樹形および整枝剪定方法などの選択をより合理的に行う必要がある。さらに、新農政プラン（平成4年）に基づく経営規模の拡大と生産費の大幅節減などを展望すれば、上記の光環境改善のための樹形や葉群構造の選択に加え、人手作業の簡易化のための低樹高化、機械化対応樹形、病虫害発生の少ない通風良好な樹形や栽植方式の探索が要請される。欧米諸外国において大規模なリンゴわい化栽培が普及する中で、最近、これに数種類の樹形や仕立て方式を組み合わせた多数の試験が実施された（Robinsonら、1991；Ferreeら、1989；Claytonら、1993）。これらの実用的な収量試験は貴重であるが、試験成績の差異には種々の要因による影響が総合的に現れるため、その要因解析、とりわけ、光環境要因の解析は難しい。上記試験の多くは樹冠内光環境の調査を含むが（Warringtonら、1989；Elfvigら、1990；Ferreeら、1993）、光強度の分布を樹冠内くまなく調査することは特に樹冠内に斑光が変幻する晴天日では実質的に不可能である（Campbell・Marini、1992）。また、多数の樹を用いた光環境比較試験ではその調査に

長期間を要し、自然投射光が日時によって異なることから、比較条件があいまいになりやすい。また、光環境の良否に強く影響する葉面積指数、樹冠容積および樹冠占有土地面積などを試験区間で等しくすることは困難である。したがって、実際の樹を用いた試験等により、冒頭に記した課題に応えることは実質的に困難である。

本報では実際の樹を用いたときに生じる上記の問題点や困難性を排除するために、コンピュータを活用してほぼ同一の葉面積指数、樹冠容積および樹冠占有土地面積を保有させながら、いくつかの単純な形の立体と葉群構造とを組み合わせることによって多様な形態、構造の樹冠（以後、モデル樹冠と記す）を記憶装置内につくり、解析比較したものである。なお、種々の栽植方式を組み合わせ、隣接樹に囲まれた樹冠を対象とした場合の解析量は膨大になることから、本報では、解析対象をまず独立樹冠に限定したものである。それぞれの独立樹冠のデータと晴天日と曇天日の2種類の投射光データを組み合わせ、樹冠内葉面放射分布推定モデル（山本、1988）により樹冠内光環境の推定比較を行った。また、樹冠形態や葉群構造を特徴づける種々の特性値（biometrical data）を用いた要因解析も行った。その結果、同一の葉量や樹冠容積を保有するという制約条件下においても、光環境を改善する樹冠形態および葉群構造の要素が見いだされ、今後のより実際の樹冠を対象とする解析のためのいくつかの参考的知見が得られたので報告する。

## 材料および方法

### 1. 樹冠内光環境の推定方法

多くの穀物畑では葉量の水平分布を均一とみなし、垂直分布に限定して畑の代表的な一部の光環境を調査あるいは推定する（Wit、1965；Ross・Nilson、1966；堀江、1981）。しかし、果樹園、茶畑、桑園あるいは庭園木など（離散分布型作物、非連続植被）の場合、葉量の水平分布の不均一性を取り入れねばならず、その光環境の調査や推定は前者に比べて格段に複雑になる（Verheij・Verwer、1973；Jackson・Palmer、1971；Jackson・Palmer、1979）。葉面放射分布を果樹の樹冠内葉量分布情報のもつ大きな自由度に対応させて推定する方法は著者が知る限りこれまで提出されなかったといっても過言ではない。著者はこの対応策の一つとして、①推定理論内に特定作物の葉量分布特性などの経験的要素を一切含めず理論立てを行う、②その代わりに外から与える全く任意の葉量データに柔軟に対応できる受け皿機構をもた

す、③仮想グリッドと斜方柱の交錯による解析手法を初めて導入すること等により、不定形植被の光環境を推定する汎用のモデル（樹冠内葉面放射分布推定モデル、以後、推定モデルと記す）を開発し（山本, 1988）、その後改良を行ってきた。本報の光環境の推定および解析手段としてこの推定モデルを用いた。

本報の解析対象となる樹冠の葉の空間分布データ（モデル樹冠データ）は比較的簡単なプログラムにより発生させた（2. を参照）。このモデル樹冠データが上記の推定モデルの入力データとなる。したがって、両者の整合性や本報の推定作業中用いるパラメータおよび推定結果などの理解のためには推定モデルの中味をある程度知っておく必要がある。そこで、既報（山本, 1988）に掲載した推定モデルの簡単な特徴を以下に記す。すなわち、3次元グリッドの内部を構成する立方体のブロックの中に葉量を任意に与え、空間的に不均一に分布する葉群データをつくる。グリッドの表面上のブロック編目の一つから任意の入射角度（高度）と方角を有した平行光線が入射すれば、斜方柱状の光束ができる。この光束がグリッドを通過する際、内部のブロックを切断する。切断によってできる様々な形の立体の容積とブロック1個の容積との比を用いて各立体内に含まれる葉量を計算すれば、この斜方柱の深さに沿った累積葉面積指数を求めることができる。そこで、光減衰式により、任意の深さにおける直射光割合ならびに放射強度を計算する。グリッドの上面および4側面の全てのブロック編目から入る同じ平行光線（上記と同じ入射角度と方角を有する）による斜方柱状光束の全てについてこの計算を繰り返す。自然光は太陽直射光と天空散乱光の重複投射であるから、上記の推定計算行程を太陽の分と天空（半天球）の全区画分について繰り返す。ただし、天空の1区画からは弱い平行光線が投射するとみなす。葉面放射強度は葉面角度（傾斜角度と方位角度）に影響されるので、供試植物に特有な葉面角度分布に基づき、1枚1枚の葉面角度をモンテカルロシミュレーション手法で発生させ、全葉の葉面放射強度を計算する（樹冠内全葉の葉面放射の瞬時分布が得られる）。上記計算行程を全推定時刻分だけ繰り返す。以上が推定モデルの極めて荒削りな概要である（詳細は既報参照）。なお、鉢植え幼樹を数個用い種々の小型樹冠をつくり、グリッドを組んでブロック内の1枚1枚の葉面放射強度を短時間内に実測し、このモデルを検証したところほぼ良好な結果が得られている（山本, 1988）。推定モデルに用いる葉量分布データの入手方法は①本報

のように任意に与える方法、②写真計測で推定入手する方法（山本・山口, 1989；山本・伊藤, 1996）および③グリッドを組んで実測する方法のいずれかによる。

本報の解析対象となるモデル樹冠データは推定モデル内で扱われる正方形グリッド内各ブロックに値をもつ3次元配列変数データ構造をもつように構築された。多種多様なモデル樹冠データの1つ1つを推定モデルに入力し、プログラムを走らせ、6時から18時までの毎時の葉面上の光合成有効光量子束密度（以後、PPFDと記す）の分布データを出力させ、その平均値（HMPPFD）と標準偏差（HPPFD<sub>SD</sub>）を計算するとともに、1日としての葉面PPFD分布データを集計し、その平均値（DMPPFD）と標準偏差（DPPFD<sub>SD</sub>）を計算した。

投射光データには、リングの葉量がおおよそプラトーに達する7月下旬のものを用いた。7月下旬の晴天日および曇天日の毎時の太陽直射光と全天天空散乱光の水平面PPFD値を既報の方法（山本, 1988）により測定し、晴天日の推定の際はそのままの数値を、曇天日の推定の際には実測値を完全散光（perfect overcast sky）に修正したものをを用いた（第1表）。

Table 1. Diurnal data of direct solar PPFD at horizontal plane (TLI, unit:  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$ ) on a clear sunny day and that of diffusive solar PPFD (SLI) on a typically cloudy day in the end of July which were used in the present estimations.

Hour time of a day	Bright sky <sup>a</sup>		Overcast sky <sup>b</sup>	
	TLI	SLI	TLI	SLI
6 a. m.	178.9	135.6	80.1	80.1
7 a. m.	573.4	246.1	270.3	270.3
8 a. m.	835.1	300.9	370.2	370.2
9 a. m.	1149.6	383.4	365.3	365.3
10 a. m.	1457.8	475.1	444.9	444.9
11 a. m.	1783.7	452.5	650.3	650.3
12 a. m.	1940.7	446.8	725.0	725.0
1 p. m.	1802.7	467.8	650.3	650.3
2 p. m.	1405.4	462.9	444.9	444.9
3 p. m.	1011.8	416.9	365.3	365.3
4 p. m.	700.7	346.3	370.2	370.2
5 p. m.	398.7	256.9	270.3	270.3
6 p. m.	165.9	125.0	80.1	80.1

<sup>a</sup> Observed data at Tsurucka on July 22 in 1985.

<sup>b</sup> Modified data as a perfect overcast sky from observed data of several cloudy days in the end of July in 1985.

なお、使用パラメータには半天球の分割数、グリッド1辺分割数のほかに、葉の傾斜角度の確率密度分布関数計算と枝による平行光線の減衰係数計算のパラメータ、葉の透過・反射による散乱光の減衰係数計算のパラメータがある（第2表）。本報ではこれらに夏期のリンゴの‘ふじ’で測定された数値（山本ら、1990）を用いた。また、平均個葉面積値に夏期の‘ふじ’の20cm<sup>2</sup>を用いた。

Table 2. Parameters used in the present estimations. These parameters are quoted from the previous paper (Yamamoto et al., 1990). The explanations of these parameters refer to the paper.

Parameters in sky hemisphere sections	
Division number in altitude angle	6
Division number in azimuth angle	8
Division number of a side of a cubic grid	21
Parameters of Beta function* in leaf inclination angle of an apple cv. Fuji in summer	
Mean angle	47.7°
Parameter $\lambda$	3.42
Parameter $\nu$	3.04
Parameters for calculation of extinction coefficients for parallel beams of stems of an apple cv. Fuji in summer	
Parameter A	0.0293
Parameter R <sub>1</sub>	0.260
Parameter R <sub>2</sub>	0.279
Parameter R <sub>3</sub>	0.211
Parameter R <sub>4</sub>	0.137
Parameter R <sub>5</sub>	0.097
Parameter R <sub>6</sub>	0.023
Parameters for calculation of extinction coefficients for transported and reflected beams of leaves of an apple cv. Fuji in summer	
Parameter D <sub>1</sub>	0
Parameter D <sub>2</sub>	0.0002733
Parameter D <sub>3</sub>	0
Parameter D <sub>4</sub>	0.1708
Parameter D <sub>5</sub>	1.989
Parameter D <sub>6</sub>	-1.302

\* Leaf inclination angles were produced and extinction coefficients for parallel beams of leaves were calculated from the function.

## 2. モデル樹冠の構築

樹冠幅や樹冠厚の拡大縮小が可能で、設定した種々の制約条件をほぼ満たしながら、広範囲の樹冠形と葉群構造を構築でき、さらに、外部および内部形態を作図する諸機能をもったプログラムを作成した（以後、樹冠構築プログラムと記す）。なお、この樹冠構築プログラムはさらにより多くの機能をもたすべく現在開発途上であり、中味の詳細な記述は後日公表することにし、ここでは構築したモデル樹冠に限定して以下に記す。

グリッド内全ブロックの葉の有無を3次元配列変数データとして出力させた。ただし、本報では葉の存在するブロック内の葉数密度を全て一定にした。全モデル樹冠に対し以下の条件（目標値）を与えた。すなわち、グリッド1辺長を3.15m、葉の存在する全ブロックの合計容積を樹冠容積（VLC）と定義し、これをグリッド1辺長を直径とする球の体積の30%、樹冠占有土地面積（AOLC）をグリッド1辺長の90%の長さを直径とする円の面積および全葉数を10,000枚とした。ゆえに、樹冠占有土地面積当たりの葉面積指数（LAI<sub>c</sub>）、AOLCおよびVLCは、それぞれ、3.170（=20cm<sup>2</sup>×10,000/AOLC）、6.309m<sup>2</sup>および4.907m<sup>2</sup>となった。樹冠底部から頂部までの距離を樹冠厚（LCT）とすればLCTが3.15mを越えないという制約条件を加えた。樹高はLCTに地面から樹冠底部までの距離を加えたもので、おおよそ3.5mを越えないことになる。グリッド1辺の分割数は21としたのでブロック1辺長は15cmおよびブロック数は9,261（=21<sup>3</sup>）個になった。葉の存在するブロックの葉数密度（葉数/ブロック容積）は均一なため葉数密度は0.00204枚cm<sup>-3</sup>（1ブロックに約6.9葉を含む）、葉面積密度は0.04075cm<sup>-1</sup>に等しい。

できるだけ多様な樹形と葉群構造を生み出すため、約40種類の単純の形の立体と約30種類の規則による容積削減方法を総当たり組み合わせた。この場合の規則とは各削減方法に特有な削減部位とその手順を指定することだけである。残存部分の容積をVLC値に近付ける計算アルゴリズムにより最終的にできあがったモデル樹冠が上記の全条件を近似的に満たすかどうかは設定段階では不明であった。

コンピュータグラフィックスによりモデル樹冠の外部形態を作図した。このほかにグリッドの東西方向あるいは南北方向の中央3ブロック列内の合計葉数をグリッド断面にプロットし、葉群分布の内部構造のプロフィール図とした。

3. 樹冠形態と葉群構造の特性値の計算

構築された各モデル樹冠のLAI<sub>c</sub>, AOLC, VLC, LCT, 内部無効容積 (IUV) および外部無効容積 (EUV) は既報の果樹の樹形・葉群構造の簡易解析システム (山本・山口, 1989) 中の該当サブルーチンプログラムを構築プログラムに移植し, これにより計算した.

さらに, モデル樹冠内に点在する葉層や間隙の厚さおよび樹冠の外部表面積の計算のためのサブルーチンプログラムを作成し, これによりモデル樹冠の葉群構造を詳細に調査した. すなわち, 葉の存在するブロック 1 個を葉層単位とみなし, グリッドの南北方向, 東西方向および

上下方向に分けて, グリッド断面上のブロック編目ごとに葉を含むブロックの連続数を数え, ブロックの 1 辺長を乗じて葉層厚とし, 方向別に集計平均したものを平均葉層厚 (LT) とした. また, 立体に属する全ブロックのうち容積削減の対象になったブロック (葉の存在しないブロック) 1 個を間隙単位とみなし, 葉層厚と同様な方法で間隙厚を方向別に集計平均し, 平均間隙厚 (CT) とした. また, 容積削減前の立体の最も外側の 1 層のブロックのうち削減処理後でも残存するブロックの数を東西南北および上下の合計 8 方向から別々に集計し, ブロック 1 面 (正方形) の面積を乗じたものを方向別の外部表

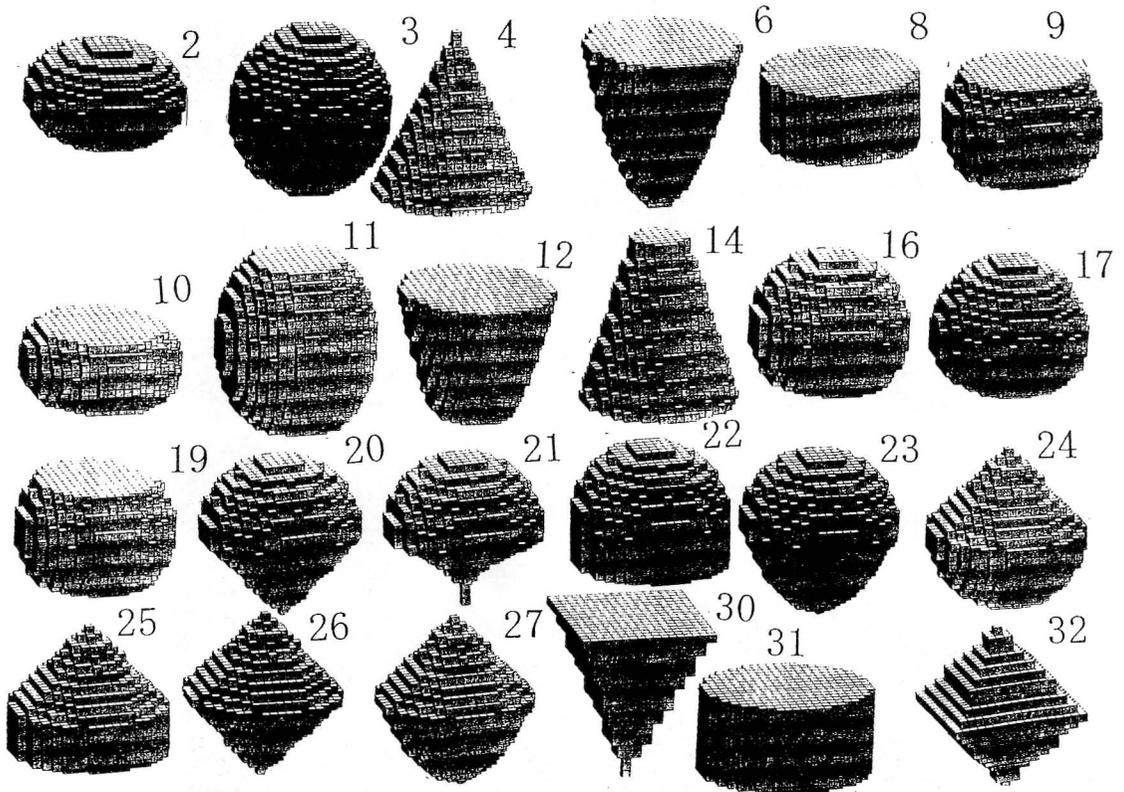


Fig. 1. Computer-graphic outputs of an appearance of the 24 solid bodies which are made of cubic blocks and used in the present estimations.

- 2: Flat spheroid. 3: Slender spheroid. 4: Circular cone. 6: Body of revolution with a parabola.
- 8: Circular cylinder. 9: Truncated sphere. 10: Truncated flat spheroid. 11: Truncated slender spheroid.
- 12: Truncated body of revolution with a parabola. 14: Truncated circular cone. 16: Spherical crown.
- 17: Slender hemispheroid (upper) + flat hemispheroid (lower). 19: Cask. 20: Sector of a sphere.
- 21: Crooked sector of a sphere. 22: Hemisphere (upper) + circular cylinder (lower). 23: Hemisphere (upper) + body of revolution with a parabola (lower). 24: Inverted sector of a sphere. 25: Circular cone (upper) + circular cylinder (lower).
- 26: Circular cone (upper) + inverted circular cone (lower). 27: Circular cone (upper) + body of revolution with a parabola. 30: Inverted pyramid.
- 31: Elliptic cylinder. 32: Pyramid (upper) + inverted pyramid (lower).

Another 8 bodies are not shown in the figure. 1: Sphere. 5, 7, 13, 15, 18 and 28: Inversion of 4, 6, 12, 14, 17 and 27, respectively. 29: Cube.

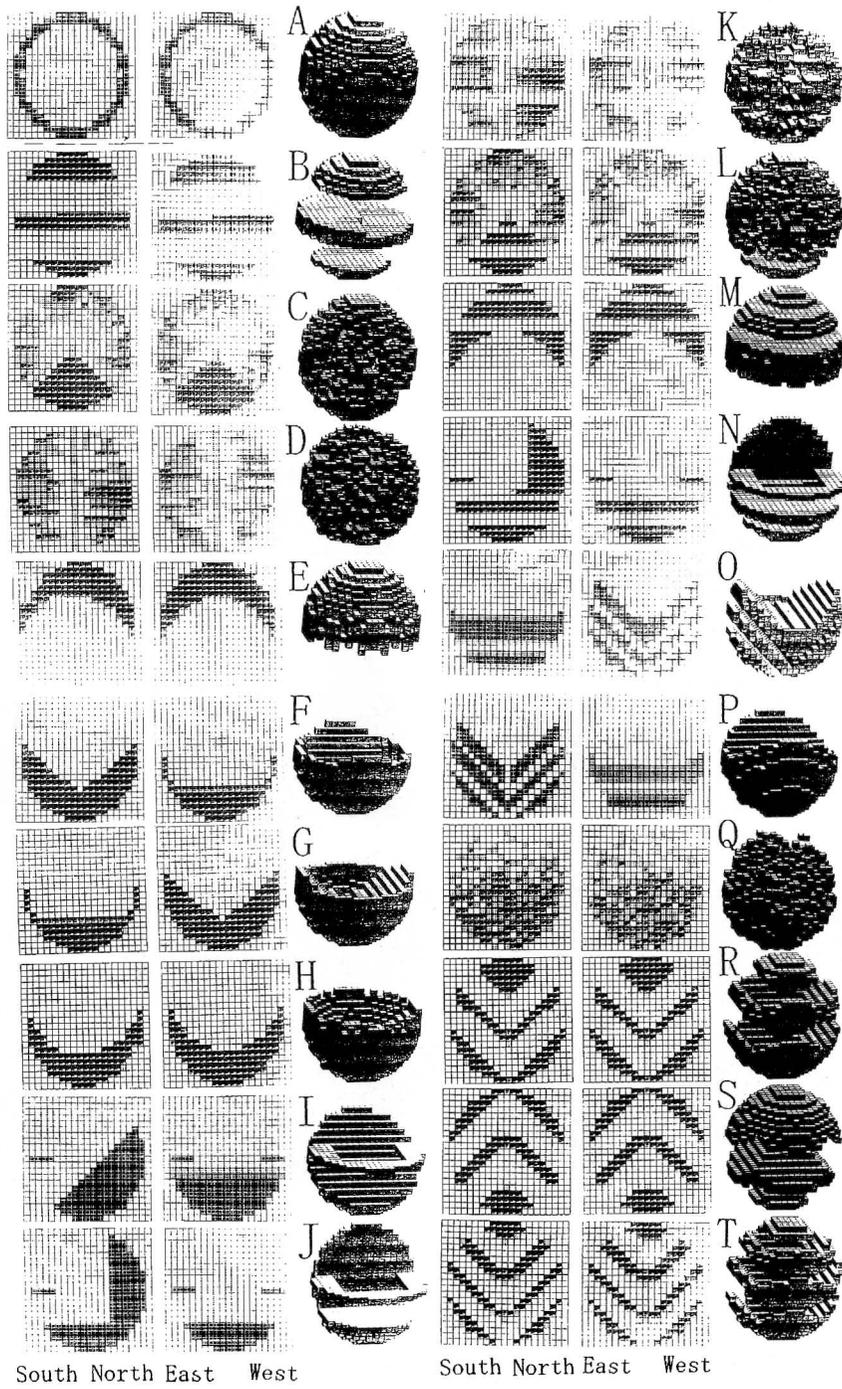


Fig. 2. Computer-graphics outputs of an appearance and 2 profiles of the internal canopy structure in central 3 block-rows of the 20 modelled-crowns which are produced by combining a sphere with 20 species of procedures for decreasing volume of solid body (A-T). A-T refer to Table 3.

面積 (S) とした。

なお、本研究が具体的な作物を特定して行ったものではないことをことわっておく。パラメータに‘ふじ’で得られたもの(第2表)と上記の目標値を用いたことには特別の関係はない。推定モデルの運用には具体的なパラメータが必要であり、リンゴの‘ふじ’のパラメータを用いただけのことである。同様に、構築したモデル樹冠がリンゴ樹を想定したものでもない。容積削減方法は現実のリンゴ樹にとってその継続維持が困難なものも多く含む。この理由は、本報の研究目的が緒言冒頭で記した課題にあり、この観点から、形や構造の違いを処理と考えれば、処理内容が単純で、極端で、多様なほど要因解析をより効率的に行うことができるものと考えたからである。

結果および考察

1. 葉面積指数 (LAI<sub>c</sub>)、樹冠占有土地面積 (AOLC) および樹冠容積 (VLC) がほぼ等しいモデル樹冠の種類と各特性値の範囲

材料および方法の2.で記した全ての条件を近似的に満たすことができたモデル樹冠は32種類の立体(第1図)と20通りの容積削減方法(第3表および第2図)の組み合わせで生じた合計640個であった。32種類の立体は28種類の回転体と4種類の非回転体からなり、前者は球、楕円球(長短2種)、円錐、円柱、放物線の回転体などを含み、後者は立方体、角錐などを含み、そしていずれも単独、上下の組み合わせ、台形化あるいはこれらの倒立したものを含んだ。特殊なものには、球冠(16)、樽形(19)、湾曲した球扇形の回転体(21)および楕円柱(31、東西が長軸)があった。構築した立体の外部形態はグリッドを構成する立方体ブロックによる積木構造を有するため、使用した立体特有な滑面を有しない(第1図)。20種類の容積削減方法(第3表)は中空化(A)、水平方向にスライス状の2層を除去(B)、樹冠中心部から放射方向にランダムに除去(C)、水平方向にランダムに除去(D)、上部表層のみを残して陥没状に除去(E)、東西方向に沿ってくさび状に除去(F)、南北方向に沿ってくさび状に除去(G)、下部表層のみを残して陥没状に除去(H)、南面をスロープ状に除去(I)、南面をL字状に除去(J)、BとDの組み合わせ(K)、BとCの組み合わせ(L)、BとEの組み合わせ(M)、BとJの組み合わせ(N)、南北方向にV字形の3層残す(O)、東西方向にV字形の3層残す(P)、クラスター構造(Kiraら, 1969)の形成(不定量のブロッ

Table 3. Twenty species of procedures for decreasing volume of a solid body.

Abbre.	Contents of the procedures
A	Empty
B	Removal of horizontal slices
C	Radiated random-removals
D	Horizontal random-removals
E	Inverted depression
F	“V” form cut in E-W direction
G	“V” form cut in S-N direction
H	Depression
I	Sloped-cut southwards <sup>2</sup>
J	“L” form cut southwards <sup>2</sup>
K	B + D
L	B + C
M	B + E
N	B + J
O	Multi “V” form cuts in S-N direction
P	Multi “V” form cuts in E-W direction
Q	Clustery layers
R	Removal of 2 inverted-pyramidal layers
S	Removal of 2 pyramidal layers
T	Removal of 3 inverted-pyramidal layers

<sup>2</sup> A horizontal ring-layer of a block thick was added at central periphery in order to maintain the AOLC value.

ク塊をランダムに除去、Q)、倒立した四角錐状の2層を重ねて除去(R)、四角錐状の2層を重ねて除去(S)および倒立した四角錐状の3層を重ねて除去(T)であった。球(1)と上記の20種類の容積削減方法を組み合わせたモデル樹冠の外部形態および内部構造のプロフィールを第2図に示した。

用いた立体の一部、たとえば、底面が正三角形の立体はAOLCの目標値から、四面体はVLCの目標値から大きく離れた。これらを除く合計640個のモデル樹冠のLAI<sub>c</sub>、AOLCおよびVLCの変動係数は3%付近にとどまり(第4表)、本研究対象の条件をほぼ満たすモデル樹冠であると見なした。目標値に完全に一致せず、近似値となった主な理由は立体が積木構造であったことによる。また、体積が大きい立方体、あるいは小さい四角錐などに種々の削減方法の規則を機械的に当てはめたため、極く一部でVLC値が平均値よりかけ離れたものが生じた(第4表のMax. とMin. を参照)。また、容積削減方法のIとJ

Table 4. Means, ranges, standard deviations (SDs) and coefficients of variations (CVs) of several biometrical data, means of daily distribution of PPFD on leaf surface (DMPPFDs), standard deviations of daily distributions of the PPFD (DPPFD<sub>SD</sub>s) and means of hourly distribution of the PPFD (HMPPFDs) under a bright sky or an overcast sky of the 640 modelled-crowns.

Items	Abbr.	Mean	Max.	Min.	SD	CV	Unit
Land area occupied by leaf canopy	AOLC	6.302	6.547	6.062	0.182	2.88	m <sup>2</sup>
Leaf area index per AOLC	LAIc	3.176	3.950	3.075	0.100	3.14	
Volume of leaf canopy	VLC	5.020	5.565	4.564	0.165	3.35	m <sup>3</sup>
Leaf canopy thickness	LCT	238.4	315.0	90.0	62.18	26.08	cm
Internal unavailable volume	IUV	1.43	11.39	0	1.467	102.58	m <sup>3</sup>
External unavailable volume	EUV	2.32	9.51	0	1.614	69.56	m <sup>3</sup>
Total unavailable volume	IUV+EUV	3.75	12.14	0.0	2.225	59.33	m <sup>3</sup>
Original volume of solid body	VOLUME	9.70	16.58	6.44	2.319	23.90	m <sup>3</sup>
Upward-outside surface area	S <sub>u</sub>	3.383	6.502	0	1.793	53.00	m <sup>2</sup>
Downward-outside surface area	S <sub>d</sub>	3.919	6.502	0	2.089	53.30	m <sup>2</sup>
Eastern-outside surface area	S <sub>e</sub>	3.223	7.717	0.402	0.776	24.07	m <sup>2</sup>
Western-outside surface area	S <sub>w</sub>	3.209	7.717	1.917	0.751	23.40	m <sup>2</sup>
Southern-outside surface area	S <sub>s</sub>	3.032	7.717	0.382	0.964	31.79	m <sup>2</sup>
Northern-outside surface area	S <sub>n</sub>	3.480	7.717	0.382	0.925	26.58	m <sup>2</sup>
Total-outside surface area	S <sub>T</sub>	20.294	41.422	8.910	4.296	21.21	m <sup>2</sup>
Mean layer thickness(vertical <sup>†</sup> )	LT <sub>v</sub>	66.95	104.4	38.7	18.68	27.90	cm
Mean cavity thickness(vertical)	CT <sub>v</sub>	66.52	240.0	26.5	30.86	46.39	cm
Mean layer thickness(EW-direc. <sup>‡</sup> )	LT <sub>EW</sub>	117.7	268.3	39.1	57.38	48.75	cm
Mean cavity thickness(EW-direc.)	CT <sub>EW</sub>	119.9	277.4	5.3	59.61	49.71	cm
Mean layer thickness(SN-direc. <sup>§</sup> )	LT <sub>SN</sub>	109.3	268.3	39.2	49.95	45.61	cm
Mean cavity thickness(SN-direc.)	CT <sub>SN</sub>	110.9	257.6	33.1	53.03	47.81	cm
Mean layer thickness(3-direc. <sup>¶</sup> )	LT <sub>M</sub>	98.0	210.3	39.0	35.04	35.75	cm
Mean cavity thickness(3-direc. <sup>¶</sup> )	CT <sub>M</sub>	99.1	240.0	30.8	40.15	40.50	cm
(PPFD on leaf surface under a bright sky)							
Mean of daily distribution	DMPPFD <sub>b</sub>	260.1	375.2	221.6	19.13	7.35	μ
SD of daily distribution	DPPFD <sub>SD, b</sub>	305.1	380.2	239.9	12.79	4.19	μ
HMPPFD at 8 a. m.	HMPPFD8 <sub>b</sub>	234.9	372.8	192.5	22.22	9.45	μ
HMPPFD at 10 a. m.	HMPPFD10 <sub>b</sub>	368.4	548.3	307.6	29.02	7.87	μ
HMPPFD at 12 a. m.	HMPPFD12 <sub>b</sub>	451.6	587.0	359.9	29.29	6.48	μ
HMPPFD at 2 p. m.	HMPPFD14 <sub>b</sub>	352.6	522.7	294.0	28.00	7.93	μ
HMPPFD at 4 p. m.	HMPPFD16 <sub>b</sub>	200.5	311.5	167.0	18.16	9.05	μ
(PPFD on leaf surface under an overcast sky)							
Mean of daily distribution	DMPPFD <sub>o</sub>	138.1	198.9	118.6	10.57	7.65	μ
SD of daily distribution	DPPFD <sub>SD, o</sub>	129.6	147.8	112.2	5.80	4.47	μ
HMPPFD at 8 a. m.	HMPPFD8 <sub>o</sub>	130.7	190.3	18.1	11.15	8.53	μ
HMPPFD at 10 a. m.	HMPPFD10 <sub>o</sub>	157.3	228.3	134.7	12.19	7.74	μ
HMPPFD at 12 a. m.	HMPPFD12 <sub>o</sub>	256.1	372.6	219.7	20.37	7.91	μ
HMPPFD at 2 p. m.	HMPPFD14 <sub>o</sub>	157.5	312.5	134.9	13.64	8.66	μ
HMPPFD at 4 p. m.	HMPPFD16 <sub>o</sub>	120.2	174.9	103.1	9.29	7.72	μ

<sup>†</sup> Measured in vertical direction.

<sup>‡</sup> Measured in east-west direction.

<sup>§</sup> Measured in south-north direction.

<sup>¶</sup> (LT<sub>v</sub>+LT<sub>EW</sub>+LT<sub>SN</sub>)/3.

<sup>¶</sup> (CT<sub>v</sub>+CT<sub>EW</sub>+CT<sub>SN</sub>)/3.

<sup>μ</sup> μ mol · m<sup>-2</sup> · sec<sup>-1</sup>.

(第2図)は立体中央部の横方向に最も膨らんだ部分を削るのでAOLCを確保するためこのブロック1段の外周部のみ残す処置をプログラム上であらかじめ施したが、これ以外の乱数を用いた削減方法においては予測不可能なため、結果的にAOLC値に平均値よりかけ離れたものが生じた(第4表)。

一方、できるだけ多様になることを期待した樹冠の形態や葉群構造に関する特性値の変動係数は数十%となり、特に無効容積で最も大きく、ついで、平均葉層厚や平均間隙厚で大きかった(第4表)。制限を設けた樹冠厚(LCT)の実現値の範囲は90cmから315cmであり(第4表)、樹高として見るとおおよそ125cmから350cmの範囲にとどまった。

## 2. 葉面PPFDの瞬時分布と日分布の特徴

全モデル樹冠のDMPPFDと各時刻のHMPPFDとの間の相関はいずれも両天候とも極めて高かった(第5表)。また、晴天日のDMPPFDと曇天日のDMPPFDとの間の相関も極めて高かったが、同一時刻の両HMPPFD間の相関は朝夕が日中より高かった(第6表)。したがっ

Table 5. Coefficients of correlation between the DMPPFD and the several HMPPFDs under a bright sky of the 640 modelled-crowns or that an overcast sky. Abbreviations refer to Table 4.

	A bright sky	An overcast sky
HMPPFD8	r = 0.8859****	r = 0.9036****
HMPPFD10	r = 0.9707****	r = 0.9721****
HMPPFD12	r = 0.8802****	r = 0.9505****
HMPPFD14	r = 0.9561****	r = 0.8340****
HMPPFD16	r = 0.9089****	r = 0.9609****

\*P<0.001.

Table 6. Coefficients of correlation between the DMPPFDs of the 2 skies and that between the HMPPFDs of the 640 modelled-crowns. Abbreviations refer to Table 4.

DMPPFD	r = 0.9290****
HMPPFD8	r = 0.8982****
HMPPFD10	r = 0.8882****
HMPPFD12	r = 0.7617****
HMPPFD14	r = 0.7540****
HMPPFD16	r = 0.9548****

\*P<0.001.

て、曇天日のみの実測結果で光環境を評価することの危険性も否定できない。

## 3. モデル樹冠の種類と光環境改善効果

640個のモデル樹冠のDMPPFDとDPPFD<sub>SD</sub>のデータから(データ省略)、32種類の立体別DMPPFDの平均値(各20個からなるグループ平均値、以下、グループ平均値と記す)とDPPFD<sub>SD</sub>のグループ平均値を比較すると(第3図)、両天候に共通してDMPPFDのグループ平均値は立体の番号で示す29, 31, 22, 11, 8, 3, 16, 1, 19, 9で大きかった。他方、20種類の容積削減方法別DMPPFDの平均値(各32個からなるグループ平均値、以下、グループ平均値と記す)とDPPFD<sub>SD</sub>のグループ平均値を比較すると、両天候に共通してDMPPFDのグループ平均値は容積削減方法の記号で示すA, L, B, Tで大きかった(第4図)。なお、全モデル樹冠のDPPFD<sub>SD</sub>そのものの変動係数が小さかったため(第4表)、DPPFD<sub>SD</sub>のグループ平均値の分布範囲は狭かった(第3図および第4図)。

次に個々のモデル樹冠について検討する。個葉の葉面受光強度とみかけの光合成速度との間の上に凸の飽和曲線の関係から、群落光合成速度を高めるには全葉の平均受光強度値が大きくかつその分散が小さいことが有効である(戸塚・木村, 1973)。そこで天候別にDMPPFDの値が上位200番目までおよびDPPFD<sub>SD</sub>の値が下位200番目までのモデル樹冠のうちから共通するものを拾いあげ、さらに、これらから両天候に共通したものに絞った。これをモデル樹冠の記号で示すと、1A, 3A, 13A, 16A, 17A, 24A, 25A, 16C, 17C, 22C, 1D, 3D, 11D, 16D, 14E, 6H, 15H, 3K, 11K, 1L, 3L, 14L, 16L, 22L, 7M, 14R, 3Tおよび14Tであった。DMPPFD値を上位100番目までにした場合には、7A, 13A, 14A, 22C, 3D, 11D, 3K, 11K, 3L, 14L, 22L, 3Tおよび14Tであった。しかし、全モデル樹冠のDPPFD<sub>SD</sub>の変動係数は晴天日と曇天日で、それぞれ、4.19%と4.47%であり、DMPPFDのそれより小さかったことから(第4表)、DPPFD<sub>SD</sub>の序列にあまりとらわれないで絞れば上記モデル樹冠に続く光環境良好なものがまだ数多くあるものと考えられる。

## 4. 樹冠形態と葉群構造に関する特性値と光環境改善効果との関係

葉群構造の特性値の変動係数が大きかった(第4表)

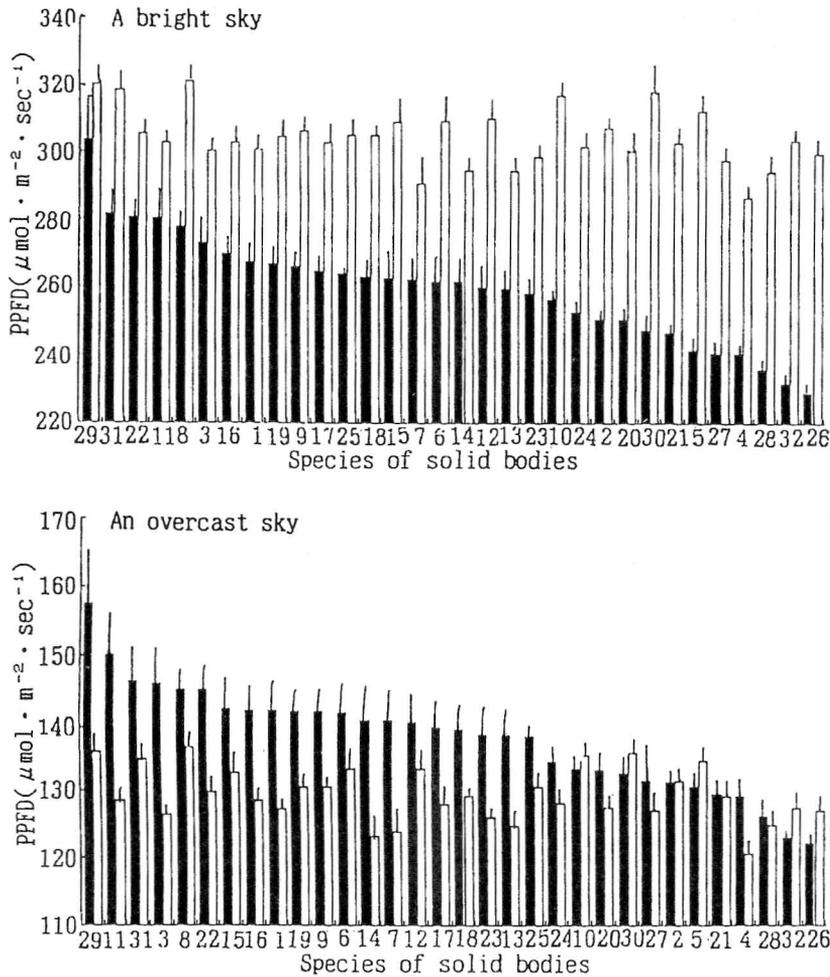


Fig. 3. Comparisons of means (closed bars) of DMPPFDs of 20 modelled-crowns of each group of a same solid body and that of DPPFD<sub>DBS</sub> (open bars) under a bright sky (upper part) or an overcast sky (lower part). Vertical lines indicate 1/2 values of their standard deviations. Numerals indicate the species of solid bodies and refer to Fig. 1.

ことから、これらとDMPPFD値などとの相関関係を調査することにより樹冠内光環境の改善要因を見いだすことができる。

1) 容積削減前の立体の大きさの影響: LAI<sub>c</sub>, AOL<sub>C</sub>およびVLCを固定しても樹高が高いほど樹冠内の葉は縦方向にまばらに分布しうから樹冠内を明るくできる。しかし、本報の解析内では樹高制限のため他の要因による影響が勝り、樹高の中味ともいえる樹冠厚(LCT)とDMPPFDや各時刻のHMPPFDとの間の相関は負であるか、正の場合でも低かった(第7表)。同一の直方体(あるいは立方体)に内接する任意の形の立体の容積は横方向への膨らみ具合によって大きく異なるから、容積

削減前の立体の容積(VOLUME)の違い(第4表)は樹の大きさのもう一つの要因である。これとDMPPFDとの間に晴天下で $r=0.6934^{***}$ 、曇天下で $r=0.6310^{***}$ の高い正の有意な相関が認められ、各時刻のHMPPFDの間にも高い正の相関が認められた(第7表)。正の相関が生まれた原因として、VLCを固定するのでVOLUMEが大きいほど容積削減量は大きくなり、樹冠内の空隙が多くなるためであると考えられる。

2) 無効容積の影響: 無効容積の概念と計測方法は本来難しいが(薬師寺, 1970; 平野・菊池, 1989), 本報では果樹の樹形・葉群構造の簡易解析システム(山本・山口, 1989)で用いられる定義と計算方法に基づいた。1)

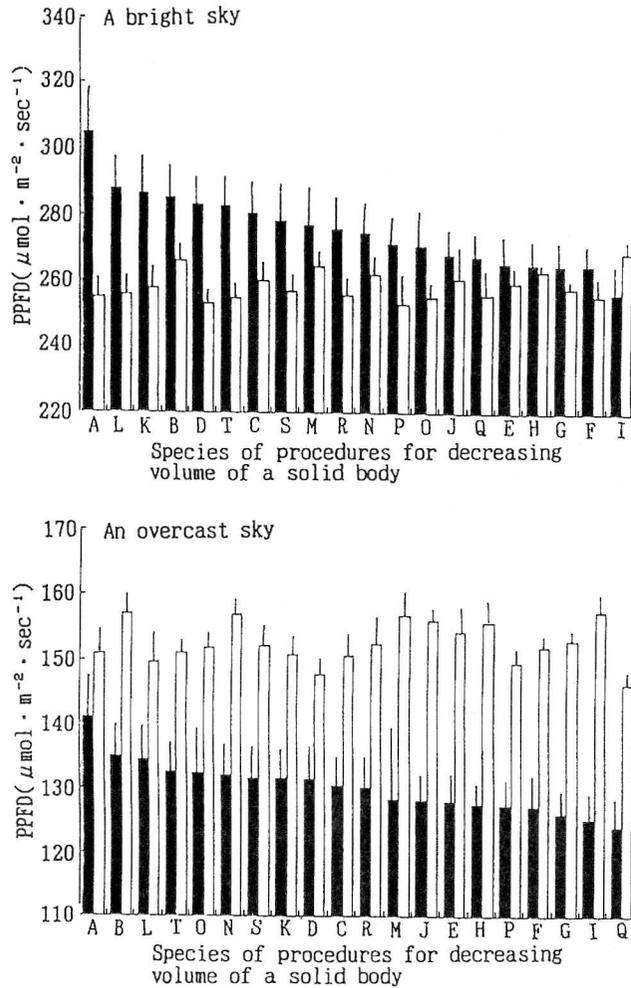


Fig. 4. Comparisons of means (closed bars) of DMPPFDs of 32 modelled-crowns of each group of a same procedure for decreasing the volume and that of DPPFD<sub>SDS</sub> (open bars) under a bright sky (upper part) or an overcast sky (lower part). Vertical lines indicate 1/2 values of their standard deviations. Numerals indicate the species of procedures and refer to Fig. 2.

で記した容積削減量の増大は総じて無効容積の増大をもたらすと考えられる。しかし、削減方法の違いの影響を受ける。IUV, EUVおよび全無効容積 (IUV + EUV) とDMPPFDおよび各時刻のHMPPFDとの間には両天候とも高い正の有意な相関が認められ (第7表), 中でも全無効容積との組み合わせで最も高かった (第7表)。

3) 平均葉層厚の影響: 仮に無効容積が同じでも樹冠内に点在する多くの葉層の厚さの分布は多様である。この葉層が厚いほどこの中を透過する光の強度は指数関数的に減衰し、また葉層が厚いほど葉層の厚さ方向に対し垂直気味に入射する直射光線はより多くの光遮断を受けるため、直射光のまま下層に到達する機会はより少なく

なる (Monsi・Saeki, 1953)。したがって、葉層の厚さの影響を厳密に評価するには、葉層の厚さを計測する方向を多数設定し、これと結びつけて厚さの分布を調査するのが望ましい。本報ではグリッドの上下方向、東西方向および南北方向に面したブロック編目単位に計測された連続した葉層単位 (ブロック) の数を、集計平均し、それぞれ、 $LT_v$ ,  $LT_{EW}$ および $LT_{SN}$ とした。これらとDMPPFDおよび各時刻のHMPPFDとの間の相関 (第7表) は全体に低かったが、有意なものを比較すると以下の傾向が認められた。すなわち、 $LT_v$ はDMPPFDおよび全時刻のHMPPFDに対し両天候とも有意な負の相関が認められたが、相関の程度は曇天日では全時刻で高く、

Table 7. Coefficients of correlation between several biometrical data, the DMPPFDs and the several HMPPFDs of the 640 modelled-crowns. Abbreviations refer to Table 4.

	LCT	IUV	EUV	IUV+ EUV	VOLUME	S <sub>0</sub>	S <sub>D</sub>	S <sub>E</sub>	S <sub>W</sub>	S <sub>S</sub>
DMPPFD <sub>0</sub>	-0.1253	<u>0.4395</u> <sup>z</sup>	<u>0.4506</u>	<u>0.6167</u>	<u>0.6934</u>	-0.0063	0.0381	0.1510	<u>0.1735</u> <sup>z</sup>	<u>0.1930</u>
HMPPFD8 <sub>0</sub>	<u>0.1700</u>	<u>0.5937</u>	<u>0.5528</u>	<u>0.7925</u>	<u>0.6266</u>	-0.1232	0.1353	<u>0.3548</u>	<u>0.3615</u>	<u>0.2576</u> <sup>z</sup>
HMPPFD10 <sub>0</sub>	<u>-0.2523</u>	<u>0.3460</u>	<u>0.3580</u>	<u>0.4878</u>	<u>0.6761</u>	0.0653	0.0080	0.0383	0.0696	0.1524
HMPPFD12 <sub>0</sub>	<u>-0.4087</u>	<u>0.2836</u>	<u>0.2624</u>	<u>0.3774</u>	<u>0.6020</u>	<u>0.1851</u>	-0.0427	-0.0288	0.0074	0.0477
HMPPFD14 <sub>0</sub>	<u>-0.2381</u>	<u>0.3492</u>	<u>0.3460</u>	<u>0.4813</u>	<u>0.6612</u>	0.0646	0.0245	0.0400	0.0699	0.1428
HMPPFD16 <sub>0</sub>	0.1321	<u>0.5741</u>	<u>0.5377</u>	<u>0.7686</u>	<u>0.6198</u>	-0.0835	0.1577	<u>0.3376</u>	<u>0.3427</u>	<u>0.2494</u>
DMPPFD <sub>0</sub>	0.0600	<u>0.5450</u>	<u>0.5336</u>	<u>0.7464</u>	<u>0.6310</u>	-0.0523	0.1305	<u>0.2995</u>	<u>0.3147</u>	<u>0.2530</u>
HMPPFD8 <sub>0</sub>	0.0349	<u>0.5153</u>	<u>0.4988</u>	<u>0.7016</u>	<u>0.6116</u>	-0.0452	0.0984	<u>0.2732</u>	<u>0.2840</u>	<u>0.2273</u>
HMPPFD10 <sub>0</sub>	0.0544	<u>0.5636</u>	<u>0.5355</u>	<u>0.7601</u>	<u>0.6527</u>	-0.0380	0.1276	<u>0.3030</u>	<u>0.3212</u>	<u>0.2513</u>
HMPPFD12 <sub>0</sub>	0.0295	<u>0.5459</u>	<u>0.5131</u>	<u>0.7321</u>	<u>0.6056</u>	-0.0507	0.1367	<u>0.2858</u>	<u>0.3033</u>	<u>0.2272</u>
HMPPFD14 <sub>0</sub>	0.0661	<u>0.4799</u>	<u>0.4560</u>	<u>0.6472</u>	<u>0.5606</u>	-0.0681	0.1182	<u>0.2596</u>	<u>0.2732</u>	<u>0.2341</u>
HMPPFD16 <sub>0</sub>	0.0492	<u>0.5425</u>	<u>0.5417</u>	<u>0.7507</u>	<u>0.6490</u>	-0.0400	0.1163	<u>0.2796</u>	<u>0.2963</u>	<u>0.2310</u>
	S <sub>N</sub>	LT <sub>V</sub>	CT <sub>V</sub>	LT <sub>EW</sub>	CT <sub>EW</sub>	LT <sub>SN</sub>	CT <sub>SN</sub>	S <sub>T</sub>	CT <sub>M</sub>	LT <sub>M</sub>
DMPPFD <sub>0</sub>	0.1564	<u>-0.3416</u>	<u>0.3430</u>	-0.1015	<u>0.2338</u>	-0.1076	<u>0.2608</u>	0.1472	<u>0.3184</u>	<u>-0.1674</u>
HMPPFD8 <sub>0</sub>	<u>0.3266</u>	<u>-0.4722</u>	<u>0.2712</u>	<u>-0.3678</u>	-0.0031	<u>-0.3015</u>	0.1087	<u>0.2527</u>	0.1158	<u>-0.4280</u>
HMPPFD10 <sub>0</sub>	0.0713	<u>-0.2650</u>	<u>0.3543</u>	0.0387	<u>0.3338</u>	-0.0112	<u>0.3149</u>	0.1031	<u>0.3946</u>	-0.0312
HMPPFD12 <sub>0</sub>	0.0227	<u>-0.1970</u>	<u>0.3001</u>	0.0640	<u>0.3239</u>	0.1042	<u>0.3793</u>	0.0836	<u>0.4041</u>	0.0494
HMPPFD14 <sub>0</sub>	0.0784	<u>-0.2663</u>	<u>0.3473</u>	0.0279	<u>0.3183</u>	-0.0158	<u>0.3038</u>	0.1095	<u>0.3802</u>	-0.0396
HMPPFD16 <sub>0</sub>	<u>0.3140</u>	<u>-0.4629</u>	<u>0.2749</u>	<u>-0.3309</u>	0.0250	<u>-0.2747</u>	0.1206	<u>0.2704</u>	0.1359	<u>-0.3934</u>
DMPPFD <sub>0</sub>	<u>0.2955</u>	<u>-0.4511</u>	<u>0.2798</u>	<u>-0.2758</u>	0.0871	<u>-0.2711</u>	0.1260	<u>0.2590</u>	<u>0.1703</u>	<u>-0.3595</u>
HMPPFD8 <sub>0</sub>	<u>0.2712</u>	<u>-0.4085</u>	<u>0.2774</u>	<u>-0.2507</u>	0.0921	<u>-0.2293</u>	0.1390	<u>0.2280</u>	<u>0.1778</u>	<u>-0.3231</u>
HMPPFD10 <sub>0</sub>	<u>0.3059</u>	<u>-0.4552</u>	<u>0.2908</u>	<u>-0.2841</u>	0.0843	<u>-0.2705</u>	0.1359	<u>0.2686</u>	<u>0.1760</u>	<u>-0.3645</u>
HMPPFD12 <sub>0</sub>	<u>0.2939</u>	<u>-0.4298</u>	<u>0.3111</u>	<u>-0.2588</u>	0.0985	<u>-0.2397</u>	0.1513	<u>0.2520</u>	<u>0.1950</u>	<u>-0.3315</u>
HMPPFD14 <sub>0</sub>	<u>0.2434</u>	<u>-0.3678</u>	<u>0.2760</u>	<u>-0.2212</u>	0.0756	<u>-0.2214</u>	0.1085	<u>0.2160</u>	0.1559	<u>-0.2913</u>
HMPPFD16 <sub>0</sub>	<u>0.2867</u>	<u>-0.4560</u>	<u>0.2793</u>	<u>-0.2835</u>	0.0771	<u>-0.2684</u>	0.1296	<u>0.2456</u>	<u>0.1668</u>	<u>-0.3633</u>

<sup>z</sup> Significant levels. — : P < 0.1%, — : P < 1% and — : P < 5%.

晴天日では朝夕で高かった（第7表）。これに対しLT<sub>EW</sub>とLT<sub>SN</sub>は曇天日では全時刻で負の有意な相関が認められ、晴天日では朝夕のみ負の有意な相関が認められた（第7表）。上記の傾向は晴天日では樹冠の側方から差し込む太陽光線遮断の影響が大きい、全方向から弱光が等しく投射する曇天日の場合は樹冠内の部位に関係なく葉層厚の影響が生じることを意味する。3方向の平均葉層厚を平均したもの（LT<sub>M</sub>）に対する相関も上記の傾向を総合的に反映した（第7表）。

4) 平均間隙厚の影響：平均葉層厚の計算が葉を含むブロックの連続数を用いたのに対し、平均間隙厚の計算は葉を含まないブロックの連続数を用いたことから、前者が大きいと後者も総じて大きくなる。加えて削減前の

立体の容積や容積削減方法の違いが微妙に影響する。上下方向の平均間隙厚（CT<sub>V</sub>）とLT<sub>V</sub>の間、東西方向の平均間隙厚（CT<sub>EW</sub>）とLT<sub>EW</sub>の間および南北方向の平均間隙厚（CT<sub>SN</sub>）とLT<sub>SN</sub>との間の相関係数は、それぞれ、0.4655\*\*\*、0.7534\*\*\*および0.6877\*\*\*であった。3方向の平均間隙厚とDMPPFDおよび各時刻のHMPPFDとの間には平均葉層厚とほぼ逆の相関関係が現れたが全体に低かった（第7表）。有意なものを参考にすると、CT<sub>V</sub>が大きいほど両天候とも光環境をわずかに改善する。しかし、CT<sub>EW</sub>とCT<sub>SN</sub>が大きくても曇天日の光環境改善に貢献せず、また晴天日では朝夕を除く日中の時間帯の光環境をわずかに改善する。3方向の平均間隙厚の平均値（CT<sub>M</sub>）に対する相関も上記の傾向を総合的に反映し

た(第7表)。

5) 外部表面積の影響: 容積削減処理の後に残存した立体の表面(外部表面)は外光が直接到達するから、この表面直下の層(表層)の葉面受光強度値は大きいと考えられる。削減処理による陥没部分あるいは迷路状の連絡空間に生じる表面(内部表面)に外光が直接到達する機会は少ない。実際の樹冠表面積の計測はその定義を含めて大変困難であるが(平野・菊池, 1989)、モデル樹冠は積木の表面構造を有するのでこの点便利である。全表面ブロックのうち上, 下, 東, 西, 南, 北, およびすべての方向を向いたブロック1面(正方形)の面積を方角別に集計し、それぞれの略号を $S_U$ ,  $S_D$ ,  $S_E$ ,  $S_W$ ,  $S_S$ ,  $S_N$  および $S_T$ で表した。これらとDMPPFDおよび各時刻のHMPPFDとの間の相関関係(第7表)は全体に低かったが、有意なものを参考にすると以下の傾向が読み取れた。すなわち、東西南北に面した外部表面積( $S_E$ ,  $S_W$ ,  $S_S$  および $S_N$ )が大きいほど曇天日の光環境をわずかに改善するが、晴天日では朝夕のみわずかに改善した。一方、上下に面した外部表面積( $S_U$  および $S_D$ )の大きさの影響は両天候ともほとんど認められない。

## 5. ま と め

果樹の樹冠は葉量を減らせば容易に明るくできるが、高品質多収の果実生産には光合成活性の高い葉づくり(山本ら, 1997)とともに、葉量の確保が不可欠である(山本ら, 1993)。一方、葉量が増えると樹冠内は暗くなる。したがって、葉量を確保しつつ樹冠内を明るくすることが可能かどうかを最初に明らかにする必要がある。しかし、緒言で記したように実際の樹を用いてこのことを確認することはほとんど不可能である。仕立て方や整枝剪定の工夫により樹冠内を明るくすることを経験できるが(文室・村田, 1987; 倉橋・高橋, 1995)、純粋に整枝せん定の工夫による効果であると判断する前に、この作業により葉量や樹冠容積が減少したためではないか、あるいは占有面積を拡大させ、葉層を薄く横方向に伸ばしたためではないかという疑問を伴う。また、13年生開心形の‘ふじ’(マルバカイドウ台)30樹を用いた樹冠内光環境と樹光合成の解析によると、ある範囲で葉量が増大(したがって、樹当たり総受光量と樹光合成量が増大)しても、明るさの指標であるDMPPFDはほぼ一定の値を保持していた(山本・高野, 1994; 山本ら, 1995)。このことは、一見、明るさ維持と葉量増大との間の矛盾の解決例であるかのごとく即断しがちであるが、この場合、

LAI<sub>c</sub>, AOLC, VLCなどが樹によって異なったため、葉群分布構造の違いがこれにどれほど関与したのかについては不明であった。本調査結果の第一の意義は、独立樹に限定され、かつ、その多くが極めて非現実的な樹冠を対象としたものであったが、ほぼ同一の葉面積指数、占有土地面積および樹冠容積のものでも樹形と葉群構造を変えることにより光環境を改善できることを解析的に示した点である。

本解析の結果、独立樹の樹冠内光環境を改善する要素とその改善機構として以下のことが考えられる。LAI<sub>c</sub>, AOLCおよびVLCを固定しても、樹形の基礎になる立体の容積が大きいと、無効容積に示される樹冠の隙間(すきま)が多くなる。したがって、割り当てられた空間ともいべき直方体に内接する立体で容積が大きいもの、たとえば、立方体、楕円柱、半球+円柱、長楕円球を用いた台形、円柱、長楕円球などの場合光環境が改善できる。隣接樹がある場合、特に密植の場合にはこの効果は消えるか逆効果が予想される。本報で設定された樹冠厚制限のもとでは樹高の違いによる影響は小さい。無効容積に加えて、平均葉層厚が薄いほどおよび平均間隙厚が厚いほど葉層中を透過する光の減衰は弱く、間隙を通過して下層に到達する光量が増えるため光環境を改善する。しかし、この両者間に正の相関関係が存在することに加え、この改善効果には葉層や間隙の走る方向と投射光の方向との間の組み合わせが複雑に関係し、総じて改善効果は小さい。外部表面積の大小は天候や時刻によりその影響の仕方が異なるが、光環境改善要素の一つであることも否定できない。容積削減方法の中で、中空化、スライス状の間隙を水平方向に2段配置したもの、下層にスライス状の間隙を水平方向に2段配置し、上層部に放射状の切れ込みを加えたものおよび倒立した四角錐状の間隙を3個上下に重ねたものなどに光環境改善効果が高かった。

なお、当研究室では隣接樹の存在する条件下でも推定できるように推定モデルの改良作業を進めており、これを用いて樹間距離や樹列間距離の組み合わせ効果の解析も可能である。今後は隣接樹や栽植距離の影響、固定するLAI<sub>c</sub>, AOLCおよびVLCの数値そのものや各種パラメータの値の違いの影響等をより現実的な樹冠を用いて解析する予定である。

## 摘 要

樹冠厚3.15m以内の条件ではほぼ同一の樹冠容積(VLC)、樹冠占有土地面積(AOLC)およびAOLC当たりの葉面積指数(LAI<sub>c</sub>)を保有させながら、20種類の単純な形の立体と32種類の立体容積削減方法を組み合わせて合計640個の多様な形態のモデル樹冠を記憶装置内につくった。これらの独立樹冠を対象に、リンゴの‘ふじ’に関する種々のパラメータを与えて、樹冠内葉面放射分布推定モデル(山本, 1988)により、7月下旬の晴天日と曇天日の葉面放射の日平均値(DMPPFD)と毎時平均値(HMPPFD)およびこれらの分散値を推定比較し、光環境の要因解析を行った。

1. 640個のモデル樹冠のLAI<sub>c</sub>、VLCおよびAOLCの平均値は、それぞれ、3.176、5.02m<sup>2</sup>および6.302m<sup>2</sup>で、この3者の変動係数は約3%、その他の特性値の変動係数は数十%になり、特に、無効容積、平均葉層厚(LT)と平均間隙厚(CT)で大きかった。DMPPFDの変動係数は晴天日で7.35%、曇天日で7.65%であり、樹冠形と葉群構造の違いだけで光環境に相当の違いが生じることが示唆された。

2. DMPPFDと容積削減前の立体容積(VOLUME)との間に晴天日で $r = 0.6934^{***}$ 、曇天日で $r = 0.6310^{***}$ の、容積削減後の樹冠の全無効容積との間に晴天日で $r = 0.6167^{***}$ 、曇天日で $r = 0.7464^{***}$ の、それぞれ、高い正の有意な相関が認められた。HMPPFDと上下方向の平均葉層厚との間に晴天日と曇天日も、また、東西方向および南北方向の平均葉層厚との間には曇天日では全時刻で、晴天日では朝夕のみ負の低い相関が認められた。なお、平均間隙厚の間には上記と逆の相関が認められた。東西南北に面した外部表面積との間には曇天日では全時刻で、晴天日では朝夕のみ正の低い相関が認められた。

3. 直方体に内接する立体の中でその容積(VOLUME)が大きいもの(たとえば、立方体、楕円柱、半球+円柱など)が樹冠形の基になると、無効容積が増え、全方向に葉層をまばらに配置できるので光環境改善効果が高かった。また、容積削減方法の中で、たとえば、中空化、スライス状の間隙を水平方向に2段配置したもの、下層にスライス状の間隙を水平方向に2段配置し、上層部に放射状の切れ込みを加えたものおよび倒立した四角錐状の間隙を3個重ねたものなどは平均葉層厚を薄く、平均間隙厚を厚くでき、光環境改善効果が高かった。

## 引用文献

- Campbell, R. J. and R. P. Marini. 1992. Instantaneous light measurements predict relative cumulative light levels within apple canopy. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 117: 678-684.
- Clayton-Greene, K. A. 1993. Influence of orchard management system on yield, quality and vegetative characteristics of apple trees. *J. Hort. Sci.* 68: 365-376.
- Elfving, D. C., I. Schechter, R. A. Cline and W. F. Pierce. 1990. Palmette-leader and central-leader tree form compared for light distribution, productivity, and fruit quality of 'McIntosh' apple trees. *HortScience* 25:1386-1388.
- Ferree, D. C., K. A. Clayton-Greene. and B. L. Bishop. 1993. Influence of orchard management system on canopy composition, light distribution, net photosynthesis and transpiration of apple trees. *Jour. Hort. Sci.* 68: 377-392.
- Ferree, D. C., R. C. Funt and B. L. Bishop. 1989. Yield and production efficiency of four apple cultivars in selected orchard management systems. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 114: 863-868.
- 平野 暁・菊池卓郎. 1989. 果樹の物質生産と収量(増収技術の基礎理論). p. 328. 農文協. 東京.
- 堀江 武. 1981. 気象と作物の光合成、蒸散そして生長に関するシステム生態学的研究. *農技研報. A.* 28: 1-181.
- 文室政彦・村田隆一. 1987. 低樹高密度植カキ園の整枝法(第2報)整枝法による葉量と光透過及び枝梢の生長の差異. *滋賀農試研報.* 28. 78-84.
- Jackson, J. E. and J. W. Palmer. 1971. Interception of light by model hedgerow orchards in relation to latitude, times of year and hedgerow configuration. *J. Appl. Ecol.* 2: 341-357.
- Jackson, J. K. and J. W. Palmer. 1979. A simple model of light transmission and interception by discontinuous canopies. *Ann. Bot.* 44: 381-383.
- Kira, T., K. Shinozaki and K. Hozumi. 1969. Structure of forest canopies as related to tree

- primary productivity. *Plant & Cell Physiol.* 10: 129-142.
- 倉橋孝夫・高橋国昭. 1995. Y字形柵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.
- Monsi, M. und T. Saeki. 1953. Über den Light-faktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduction. *Jap. J. Bot.* 14: 22-52.
- Robinson, T. L., A. N. Lakso and S. G. Carpenter. 1991. Canopy development, yield, and fruit quality of ‘Empire’ and ‘Delicious’ apple trees grown in four orchard production systems for ten years. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 116: 179-187.
- Ross, Iu. K. and T. Nilson. 1966. 群落内におけるバイオマスの垂直分布. 内嶋善兵衛訳. 光合成と多収穫. 農林水産技術会議編. p. 89-101.
- 戸塚 績・木村 允. 1973. 生態学講座. 9. 植物の生産過程. p. 70. 共立出版. 東京.
- Verheiji, E. W. M. and F. L. J. A. Verwer. 1973. Light studies in a spacing trial with apple on a dwarfing and a semidwarfing rootstock. *Sci. Hortic.* 1: 25-42.
- 薬師寺清司. 1970. 温州ミカンの栽植密度に関する研究 — 計画密植の基礎理論 —. 愛媛果試報. 6: 1-85.
- 山本隆儀. 1988. 果樹における葉面放射の樹冠内分布推定シミュレーションモデル. *山形大学紀要 (農学)*. 10: 583-612.
- 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・伊藤博祐・野堀秀明・佐々木 宏. 1997. セイヨウナシ葉の諸形質および炭酸ガス拡散抵抗要因と光合成活性との関係. *園学雑.* 66: 45-47.
- 山本隆儀・佐藤吉雄・舟生卓磨・石嶋幸夫・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・高野隆志. 1994. 同一樹齢のリンゴのマルバカイドウ台‘ふじ’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)* 12: 31-50.
- 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・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.
- Warrington, I. J., C. J. Stanley, D. S. Tustin, P. M. Hirst and W. M. Cashmore. 1989. Influence of training system on ‘Granny Smith’ yield and fruit quality. *Compact Fruit Tree* 22: 12-20.
- Wit, C. T. de. 1965. Photosynthesis of leaf canopies. *Agric. Res. Report.* 663: 1-56. PUDOC Wageningen.