

葉量を変えない条件下の樹冠の部分的変形が
果樹園光環境に及ぼす影響
—モデル手法を用いた解析結果—

山 本 隆 儀

山形大学名誉教授

(平成 28 年 9 月 9 日受付・平成 28 年 12 月 9 日受理)

Effects of Partial Deformations of Canopy Shapes
without Changing of Leaf Volume on Light Environments in Orchards:
Analytical Results Using Model Methods

Takanori YAMAMOTO

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

(Received September 9, 2016 · Accepted December 9, 2016)

山形大学紀要（農学）第17巻 第4号 別刷（平成29年）

Reprinted from Bulletin of Yamagata University

(*Agricultural Science*) Vol. 17 No.4 (2017)

葉量を変えない条件下の樹冠の部分的変形が 果樹園光環境に及ぼす影響 —モデル手法を用いた解析結果—

山 本 隆 儀

山形大学名誉教授

(平成28年9月9日受付・平成28年12月9日受理)

Effects of Partial Deformations of Canopy Shapes without Changing of Leaf Volume on Light Environments in Orchards: Analytical Results Using Model Methods

Takanori YAMAMOTO

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

(Received September 9, 2016 · Accepted December 9, 2016)

Summary

Under conditions of no change of leaf volume and almost retaining of original canopy shape, next partial deformations were treated on the many canopies which were dealt in the previous report (Yamamoto, 2016). The mechanical deformations, in which leaf blocks in a grid were eliminated and relocated, were divided into the following eight types by the difference of the elimination area; the central area (k), the bottom area (p), the radial areas (e), the northern area, the southern area or the both areas (r), the oblique downward area in the northern side, the oblique upper area in the southern side or the both areas (u), the several stairs, the several rows or the both (q), the lengthwise areas cut off using several cross sections (s) and the simple formed solids distributing with regular intervals (j). Further the mechanical deformation contained another 2 types; the decrease in number of leaf blocks in an area (h) and the rotation (x). The partial deformations by relocations of leaf blocks after analyses of canopy shapes comprised the next four types; relocation of leaf blocks to dissipate large leaf block agglomerations (i), that to rise proportion of surface leaf blocks (b), that to decrease beam leakage to the ground (m) and that to avoid simultaneous being of the overcrowded leaf blocks and the under-population (g). The each type contained several varieties which were different to each other by the detailed processing. The orchard light environments were compared among the canopies over 52,000 using OLEAS (Yamamoto, 1999). As the results, the improvement effect of orchard light environment on a clear day was the following order; $h > k > m > g \geq b \approx r \approx u > x > e \approx i > j \approx p > q > s$, and that on an overcast day was the following order; $k > h > g > m \approx b > x > i \approx e \geq r \approx p \approx j \approx q > s > u$. By the deformations, the characteristics of canopy shapes also changed and seemed to contribute for the effects.

Key words : canopy shape as prototype, characteristics of canopy shape, 3-dimensional structure of foliage distribution, training and pruning, relocation of leaf layers

緒 言

農業は太陽光エネルギーの収穫であり、果樹農業も例外ではない。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。上記の観点から前報（山本, 2016）では、樹冠内葉層分布の3次元構造と果樹園光環境の関係を解析した。すなわち、樹冠原形の29類型に属する合計528個の多様な樹冠形を対象に、果樹園光環境解析システム（OLEAS, 山本, 1999）を用いて光環

境を解析した。その結果、上記樹冠形のうち、光環境良否の序列が高かった樹冠形には棚状樹冠のようなやや特殊な樹冠形が含まれた。一方、この序列の低かった樹冠形には立木仕立てのような立体的な樹冠形が多く含まれた（山本，2016）。果樹樹冠の多くが後者の立体的なものであることを考えると、何らかの方法により、これらの光環境改善が望まれる。そこで本報では、葉量を変えない条件で部分的な変形処理方法を様々考案したうえで、前報で扱った樹冠形に対しこれらの部分的な変形処理を施した。そして、このときの光環境を変形処理前のものと比較したものである。研究目的が光環境改善要因の検出である点、本報は前報（山本，2016）の延長上にあるが、前報（山本，2016）で扱った樹冠形数の約100倍の数を扱うことが予想されたので別報となったものである。なお、本報で言う部分的な変形処理とは、割り当て空間内の葉ブロック数を変えず（葉量を変えず）、また、樹冠原形を大きく逸脱しないように葉層分布を部分的に変更したものである（以下、変形処理と略す）。

ところで、葉量を変えないことがどれほど重要なのかについて考えてみたい。1樹の葉量が同じでも樹高が高いほど、もしくは、1樹割り当て土地面積が大きい（疎植）ほど葉はまばらになりやすく、樹冠内は明るくなると考えられる。そのため、果樹園光環境を何らかの処理間で厳密に比較するには、1樹割り当て空間容積（＝制限樹高×割り当て土地面積）を一定にすることが望ましい（山本，2014；山本，2015；山本，2016）。おまけに、1樹割り当て空間容積が同じでも、この中に含まれる葉量が変われば光環境は総じて変わるものと考えられる。念のため、既報（山本，2014）の実験データを用いてこのことを確認した。その1例として、リング開心形のモデル樹冠1樹における20年間の園地当たり葉面積指数（LAI₀）と同一光投射条件下（7月下旬の曇天日）における日平均葉面PPFDの間の相関を調査したところ、 $r = -0.9504^{***}$ の高い負の相関が見出された。したがって、樹冠形の違いが光環境に及ぼす影響を正確に調査する場合、光環境を左右する葉量を厳密にコントロールする必要がある。とは言うものの、実際の樹冠になんらかの変形処理や樹形改造などを行う場合、現場での葉量計測が容易でない（浅田，1989）、変形や改造に伴って葉量が必ず変わるものと考えられる。

ところで、前報（山本，2016）と本報において、樹形（仕立て方法や枝の配置の仕方）を扱わず、樹冠形（葉

層の空間分布）のみを扱ったこと、しかも、このときの樹冠形が常識的な範囲を大きく逸脱した理由は、以下の3つであった。すなわち、①樹形や樹冠形は国、地域によって極めて多様であること（多様性）から、研究対象をできるだけ多様な樹冠形までに広げて光環境を比較することをまず優先すべきである、②樹形は栽培環境や経営条件の変化、技術の進歩などにより大きく変遷すること（一過性）から、本研究対象を自国で流行している樹形の範囲に絞るべきでない、③光環境改善要因の検出が急務であり、このためには樹冠形と光環境の関係をまず明らかにし、この結果を踏まえ、受光態勢改善を可能にする整枝法などを考案すべきである、と考えたためである。要するに、世界のいたる所に果樹が栽培されていること、および、今後の人類による果樹栽培の営みの長さを考えた時、樹冠形と光環境の研究は、国・地域や時代を超えた研究として位置付ける必要があると考えたものである。

さて、本報における実験の柱を列挙すると以下の通りである。①14類型にまたがった合計118種類の変形処理の考案、②前報（山本，2016）に用いた528個の樹冠形を対象にした各変形処理実験、③変形処理前の光環境関連データに対する変形処理後の光環境関連データの比率の調査、④変形処理前の樹冠形状値に対する変形処理後の樹冠形状値の比率の調査、⑤上記③の結果に関する変形処理の類型間比較、⑥上記③の結果に関する処理対象樹冠形（原形）の類型間比較、⑦同一類型内における個々の変形処理方法間の光環境改善効果の比較および⑧変形処理類型と処理対象樹冠形（原型）のタイプの組み合わせ効果の調査であった。

材料および方法

1. 変形処理の対象となった樹冠形および変形処理後樹冠形の命名方法

既報（山本，2016）で扱った樹冠原形の26類型に属する合計528種類の樹冠形に対して変形処理を施した。分量の関係から、各類型に属する個々の樹冠形の詳細については既報（山本，2016）を参照してもらうこととし、ここでは類型に限りその名称と略号を記した。すなわち、棚状連続体（類型略号はA、以下、同様）、単純な回転体状連続体（B）、単純な非回転体状連続体（C）、葉層断面形の輪状連続体（G）、葉層断面形のらせん状連続体（E）、各段の回転開始角度が同じ単位葉層の輪状散

在体 (Q), 各段の回転開始角度をずらした単位葉層の輪状散在体 (H), 単位葉層の傾きが乱雑な輪状散在体 (S), 単位葉層の大きさが乱雑な輪状散在体 (V), 単位葉層の傾きと大きさが乱雑な輪状散在体 (X), 各週の開始角度が同じ単位葉層のらせん状散在体 (F), 各週の開始角度をずらした単位葉層のらせん状散在体 (Z), 単位葉層の傾きが乱雑ならせん状散在体 (T), 単位葉層の大きさが乱雑ならせん状散在体 (W), 単位葉層の傾きと大きさが乱雑ならせん状散在体 (Y), 樹冠中心部からの放射状散在体 (P), 樹冠底部からの放射状散在体 (N), 大型単位葉層の少数分離散在体 (O), 上下組み合わせによる樹冠原形 (I), 南北組み合わせによる樹冠原形 (J), 細形樹冠モデル4個からなる樹冠原形 (R), 扁平樹冠モデル2個からなる樹冠原形 (U), CACOAS起源の樹冠原形 (L), 等間隔散在体 (D), 無作為的散在体 (K) およびその他の特殊な樹冠原形 (M) であった (第1表).

個々の樹冠形の表現は, 既報 (山本, 2016) と同様に, 樹冠原形の類型略号 (大文字アルファベット) + 樹冠形番号 (2桁の数字) + 葉ブロック数調節処理記号 (z, w あるいはtのいずれか) を用いた. 変形処理を施した樹冠形の表現は上記に続き, 2. に記す変形処理の類型略号 (小文字アルファベット) と個々の変形処理方法の番号 (2桁の数字) を追加したものであった.

Table 1 The classifications of canopy shapes as prototype.

Codes	Contents
A	Trellis
B	Body of revolution
C	Body of non-revolution
G	Annular continuum of a cross section of foliage
E	Helix continuum of a cross section of foliage
H	Annular scatter of an unit foliage (starting angle was shifted in each stair)
Q	Annular scatter of an unit foliage (starting angle was same in all stairs)
S	Annular scatter of unit analogous foliages with disordered inclination angle
V	Annular scatter of unit analogous foliages with different size
X	Annular scatter of unit analogous foliages with disordered inclination angle and different size
Z	Helix scatter of an unit foliage (starting angle was shifted in each circuit)
F	Helix scatter of an unit foliage (starting angle was same in all circuit)
T	Helix scatter of unit analogous foliages with disordered inclination angle
W	Helix scatter of unit analogous foliages with different size
Y	Helix scatter of unit analogous foliages with disordered inclination angle and different size
P	Radial scatter of foliages from the canopy center
N	Radial scatter of foliages from the canopy bottom
O	Disconnected scatter of large foliages
I	Top canopy and bottom one were different
J	Southern canopy and northern one were different
R	Canopy composed of four slender canopies
U	Canopy composed of two flat canopies
D	Canopy in which each foliage scatters with same distance
K	Canopy in which each foliage is randomly distributed
L	Canopy which CACOAS constructed
M	Special canopy which did not belong to A-L

2. 変形処理方法の概要

変形処理方法の考案に当たり, 前報 (山本, 2016) における考察の内容を参考にした, すなわち, 樹冠が薄いほど, 単位葉層が平板状なほど, 葉層断面形が単純なほど, 樹冠内に空隙が適度に分散するほど, 樹冠表面の葉層の割合が高いほど, 割り当て空間いっぱい樹冠が広がるほど, 葉層の過密と過疎の併存状態が少ないほど, 地面に漏れる光が少ないほど, 葉塊当たりの葉ブロック数が少ないほど光環境は改善しやすくなることであった. これらを踏まえ, 部分的変形処理を以下の2つに大別した. つまり, ①機械的に指定した領域内の葉ブロックを除去し, 除去ブロックを避けて再配置あるいは樹冠形全体を回転する処理 (以下, 機械的変形処理), ②ある目的をもって樹冠形状を解析し, この解析結果と目的に沿って葉ブロックを移動する処理 (以下, 目的別変形処理) であった (第2表). では, 機械的変形処理にはどんなものを設けたか. 列挙すると, 指定領域内葉ブロック数の減少 (類型h), 中心部葉ブロックの削除 (類型k), 底部葉ブロックの削除 (類型p), 底部あるいは中心部から放射状に形成される領域内の葉ブロックの削除 (類型e), 北側一部, 下側一部あるいはこの両者における葉ブロックの削除 (類型r), 南側, 北側あるいはこの両者を斜めに切り取る領域内の葉ブロックの削除 (類型u), グリッド網目に沿ったスライス状領域あるいは格子状領域における葉ブロックの削除 (類型q), 様々な断面形を用いて垂直状に切り取ってできる領域内の葉ブロックの削除 (類型s), 等間隔に散在する単純立体内の葉ブロックの削除 (類型j) および様々な回転角度を用いた樹冠形まるごとの回転 (類型x) の合計10類型であった (第2表). 一方, 目的別変形処理には次の4類型を設けた. すなわち, 大きな葉ブロック塊の除去 (類型i), 樹冠表層部における葉ブロック数割合の増大 (類型b), 地面漏れする投射光割合の減少 (類型m) および葉ブロックの過疎過密状態の部分的解消 (類型g) であった (第2表).

だけど, 変形処理の種類によっては, 処理対象樹冠形との組み合わせが無意味な場合もあった. 例えば, 樹冠原形が回転体や非回転体で, そのうえ, 中空化処理された樹冠形 (葉ブロック数調節処理がt処理タイプ) では, 樹冠内部における葉ブロックの削除のような変形処理は無意味であった. それゆえ, 樹冠原形が回転体や非回転体の場合では, t処理タイプの樹冠形は対象外とし, 乱

数による葉ブロック数調節処理を施した樹冠形（z処理タイプ）のみ変形処理の対象とした。それから、棚状樹冠形では、棚以外の領域の葉ブロック削除は無意味になる。棚状樹冠形を含んだ上下組み合わせの樹冠形あるいは南北組み合わせの樹冠形の場合でも同様であった。さらに、処理前の樹冠形が割り当て空間いっぱいには広がったような場合、これに回転処理を施すと、回転前にグリッドの対角線方向に存在した葉ブロックの多くが割り当て空間外に出てしまう。よって、これらは回転処理の対象外とした。なお、以下の各変形処理方法の文中（3.）では変形処理対象の範囲を併記した。

変形処理方法に従い削除した葉ブロックについては、削除した部位を避け、そのうえ、元の樹冠形が大きく崩れないように、乱数を用いて樹冠原形内の空ブロックに再配置したが、最終的に所定の葉ブロック数を確保せねばならない。しかしながら、変形処理方法と処理対象樹冠形の組み合わせによっては、これが不可能な場合もあった。例えば、体積の小さい円錐体では、葉ブロックを削除し、削除した場所を避けながら、不足分を円錐体内に再配置しようとしても、場所が限られ、全てを再配置することが不可能になった。このような事態は予測しがたいことから、各変形処理のプログラム計算処理の結果、所定の葉ブロック数に到達しなかった組合せについては、変形処理不能として最終的に除外した。

Table 2 The classification of partial deformations of canopy shapes. The eliminated leaf blocks were finally relocated to another empty blocks within original canopy as prototype using random number in order to keep the total leaf block number.

Codes	Contents
h	Contraction of number of leaf blocks in a set area in the grid
k	Elimination of leaf blocks in a central area in the grid
p	Elimination of leaf blocks in a bottom area in the grid
e	Elimination of leaf blocks in a radiate area in the grid
r	Elimination of leaf blocks in a northern area, a southern area or the both in the grid
u	Elimination of leaf blocks in an oblique downward area in the northern side, an oblique upper area in the southern side or the both
q	Elimination of leaf blocks in several stairs, several rows or the both in the grid
s	Elimination of leaf blocks in the lengthwise area cut off using several cross section in the grid
j	Elimination of leaf blocks within simple formed solids with regular-interval distributing in the grid
i	Relocation of leaf blocks to delete large agglomerates after diagnosis of the foliage distribution
b	Relocation of leaf blocks to rise proportion of surface leaf blocks after diagnosis of the foliage distribution
m	Relocation of leaf blocks to decrease proportion of light leakage to ground after diagnosis of the foliage distribution
g	Relocation of leaf blocks to avoid simultaneous being of under-population of leaf blocks and the overcrowding after diagnosis of the foliage distribution
x	Rotation of whole canopy

3. 各変形処理方法

1) 類型h（指定領域内葉ブロック数の減少）

z処理タイプの樹冠形に限定し、指定領域の葉ブロック数を、乱数を用いて4分の1ほど削除し、削除した部分を避けて、乱数により空ブロックに再配置した。指定領域として、楕円球下半分（h01）、楕円球上半分（h02）、倒立三角錐台（h12）および三角錐台（h13）を設定した（第1図）。このほか、指定領域内の葉ブロック数削減密度に勾配を与え、かつ、乱数を用いて削減ブロックを決めながら、最終的に4分の1ほど削減し、削除した部分を避けながら乱数により空ブロックに再配置する処理も設けた。すなわち、葉ブロック数削減密度が上部ほど（h06）、下部ほど（h07）、上部と下部ほど（h08）、中間部ほど（h09）、北部ほど（h10）および南部ほど（h11）、それぞれ、高くなるようにした（第1図）。

ところで、第1図における指定領域は葉ブロックの存否とは無関係に示したものであった。この指定領域と葉ブロックが重複したときだけ変形処理が実施されたため、変形処理後の樹冠形については想像するしかない。そこで、読者が理解し易いように、各類型における変形処理後の1例に限り第2図に示した。第2図は、共通の題材として、樹冠原形が円柱（B01、第2図の右下）のz処理タイプの樹冠形（B01z）を処理前樹冠形として取り上げたものである。それから、B01zの積木構造図（ソリッドモデル図）とグリッド東面および上面から見た葉ブロック数の投影図を第2図最上段に示した。この3者以外の部分は、B01zと各類型における1つの変形処理方法を組み合わせたときの処理後樹冠形を示した。ただし、分量の関係から、各類型1つに絞り、しかも、積木構造図の場合もあれば、葉ブロック数投影図の場合もあったので、第2図最上段の3者のいずれかを見比べて欲しい。ちなみに、類型hについては第2図のB01zh01を参照されたい（以下の類型についても同様に参照されたい）。また、第1～10図に模式的に表示した指定領域は滑らかな線で記されたが、実際にはグリッドの網目に沿ったものであったことを断わっておきたい。

2) 類型k（割り当て空間中央部の指定領域内葉ブロックの削除）

z処理タイプの樹冠に限定し、割り当て空間中央部における様々な形状の指定領域内葉ブロックを機械的に除去した後に、この部分を避けて、乱数により樹冠内空ブロックに再配置した。指定領域として、球（k02）、円

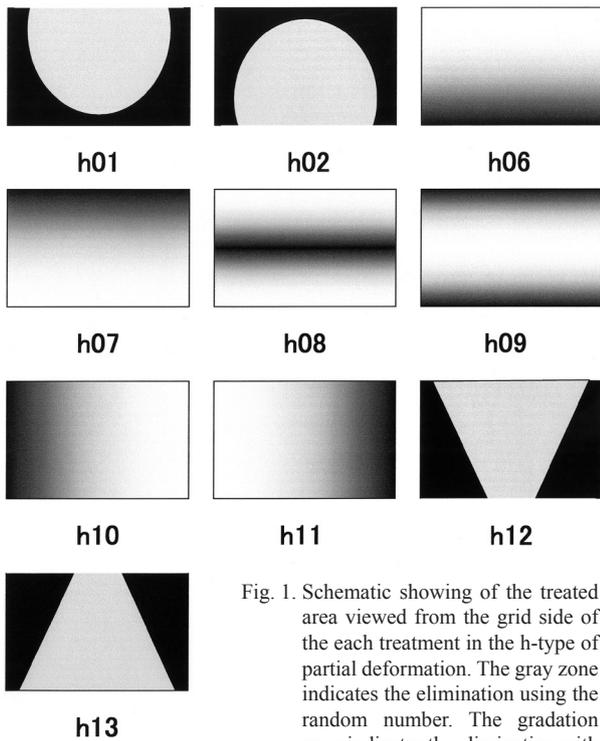


Fig. 1. Schematic showing of the treated area viewed from the grid side of the each treatment in the h-type of partial deformation. The gray zone indicates the elimination using the random number. The gradation zone indicates the elimination with the density gradient.

錐 (k03), 倒立円錐 (k05), 3個の円板 (k07), 1個の縦円筒 (k12) および2重の縦円筒 (k13) を設定した (第3図および第2図のB01zk02).

3) 類型p (割り当て空間底部の指定領域内葉ブロックの削除)

z 処理タイプの樹冠に限定し, 割り当て空間底部における様々な形状の指定領域内葉ブロックを機械的に除去した後に, この部分を避けて, 乱数により樹冠内空ブロックに再配置した. 指定領域として, 半球 (p01), 横長半楕円球 (p02), 縦長半楕円球 (p03), 円錐 (p05), 3個の円板 (p09) および2重の縦円筒 (p10) を設定した (第4図および第2図のB01zp10).

4) 類型e (割り当て空間底部あるいは中心部からの放射線状領域内葉ブロックの削除)

全樹冠形を対象に, 割り当て空間の底部あるいは中心部から放射線状に形成される領域に含まれた葉ブロックを削除した後に, この部分を避けて, 乱数により樹冠内空ブロックに再配置した. 傾き数×方角数で放射線数を示したとき, 底部から5×5 (e01), 7×7 (e02), 9×9 (e03), 11×11 (e04) および13×13 (e05) の5種類, および中心部から9×5 (e06), 11×7 (e07), 13×9 (e08), 15×11 (e09) および17×13 (e10) の5種類の

処理を設定した (第5図および第2図のB01ze10).

5) 類型r (割り当て空間の北側一部, 下側一部あるいはこの両者の領域内葉ブロックの削除)

z 処理タイプの樹冠に限定し, 割り当て空間の北側一部, 下側一部あるいはこの両者の領域内葉ブロックを除去した後に, この部分を避けて, 樹冠内空ブロックに乱数で再配置した. 指定領域として, 北側半分の2分の1 (r02), 北側半分の3分の1 (r03), 下側半分の2分の1 (r05), 下側半分の3分の1 (r06), 北側半分の3分の1と下側半分の3分の1 (r08) および北側半分の2分の1と下側半分の2分の1 (r09) を設定した (第6図および第2図のB01zr08).

6) 類型u (割り当て空間の南側, 北側あるいはこの両者を斜めに切り取ってできる領域内葉ブロックの削除)

z 処理タイプの樹冠に限定し, 割り当て空間の南側, 北側あるいはこの両者を斜めに切り取ってできる領域における葉ブロックを削除した後に, この部分を避けて乱数により樹冠内空ブロックに再配置した. 指定領域として, 南側2分の1の上部を斜めに切り取ってできる領域 (u01), 南側4分の1の上部を斜めに切り取ってできる領域 (u02), 北側2分の1の下部を斜めに切り取ってできる領域 (u03), 北側4分の1の下部を斜めに切り取ってできる領域 (u04), u01とu03の両領域 (u05) およびu02とu04の両領域 (u06) を設定した (第7図および第2図のB01zu06).

7) 類型q (グリッドの網目に沿ったスライス状あるいは格子状領域内葉ブロックの削除)

全樹冠形を対象に, グリッドの網目 (縦15段, 東西21列, 南北21列) に沿って, スライス状あるいは格子状の領域内葉ブロックを削除した後に, この部分を避けて乱数で樹冠内空ブロックに再配置した. 4~5段と10~11段を削除 (q01), 東西の6~7列と14~15列の削除 (q02), 南北の6~7列と14~15列の削除 (q03), 4~5段, 10~11段および東西11列の削除 (q04), 4~5段, 10~11段および南北11列の削除 (q05), 東西11列と南北11列の削除 (q06) および東西11列, 南北11列および8段の削除 (q07) の合計7処理を設けた (第8図および第2図のB01zq01).

8) 類型s (様々な断面形を用いて垂直状に切り取った領域内葉ブロックの削除)

全樹冠形を対象に, 様々な断面形を用いて垂直状に切り取った領域内の葉ブロックを削除した後に, この部分を

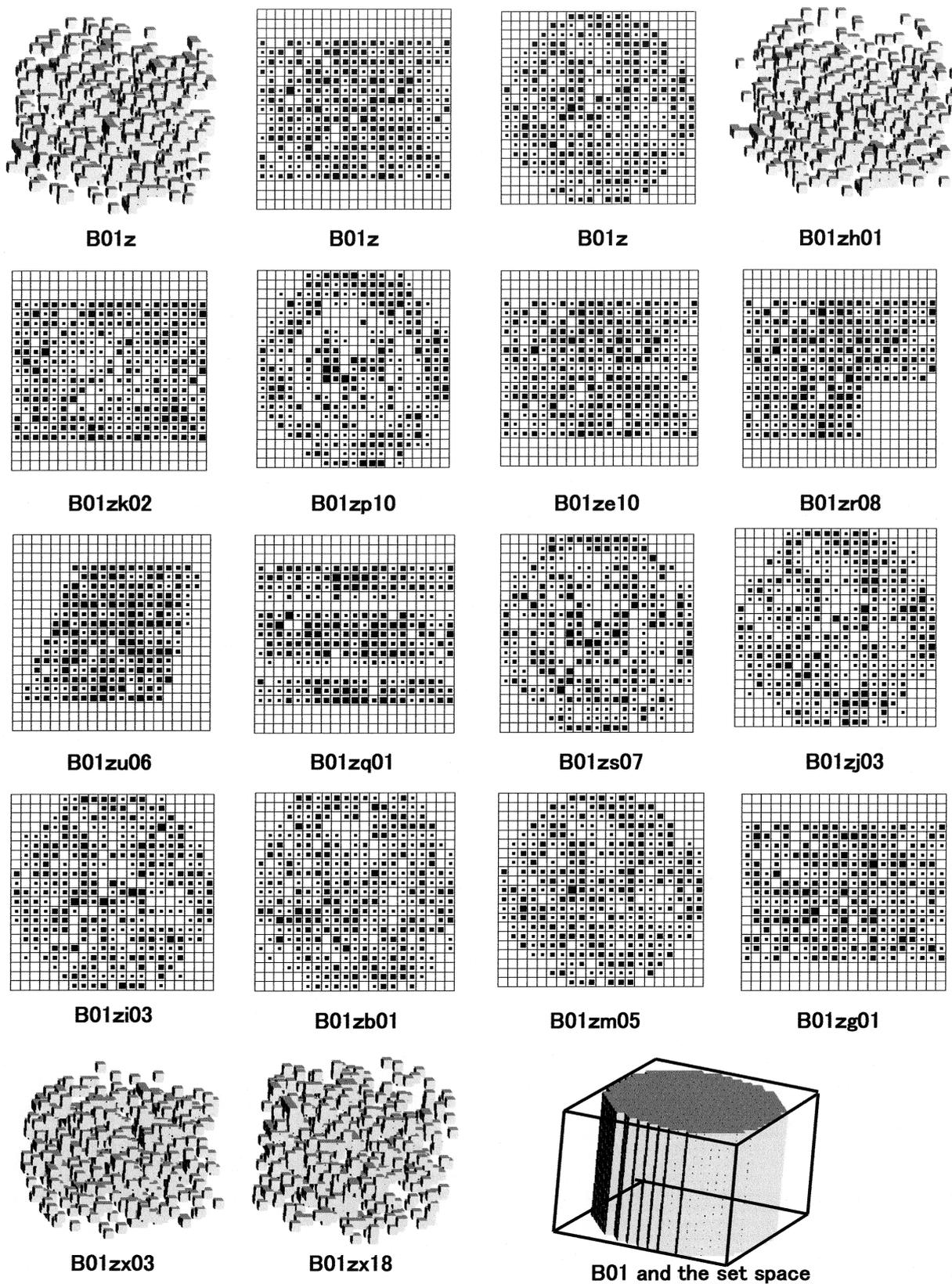


Fig. 2. Examples of projection of the number of leaf blocks or the solid body after each partial deformation using a canopy shape of cylinder type (B01z). The solid body as the prototype (B01) was shown in the under right of the figure. The sizes of black squares indicate relative scales of total number of leaf blocks per square in the mesh along the direction from the east to the west or that from the zenith to the earth in the grid.

避けて乱数で樹冠内空ブロックに再配置した. 垂直状に切り取ったときの断面形および場所として, 東西2か所に楔形 (s01), 南北2か所に楔形 (s02), 3か所に楔形 (s03), 4か所に楔形 (s04), 中心部に1個の大きい円 (s05), 5か所に小さい円 (s06), 中心部に2重の円環 (s07), 車軸状 (s08), ほぼ均等に分散した49個の正方形 (s09) およびほぼ均等に分散した64個の正方形 (s10) を用いた (第9図および第2図のB01zs07).

9) 類型j (等間隔に散在する単純形立体内葉ブロックの削除)

z 処理タイプの樹冠に限定し, ほぼ等間隔に散在する単純形立体内の葉ブロックを削除した後に, この部分を避けて乱数で樹冠内空ブロックに再配置した. 単純形立体には円弧板 (j01), 矩形板 (j02), 円板 (j03), 小さい球面板 (上半分) (j04) および大きい球面板 (上半分) (j05) を用いた (第10図および第2図のB01zj03).

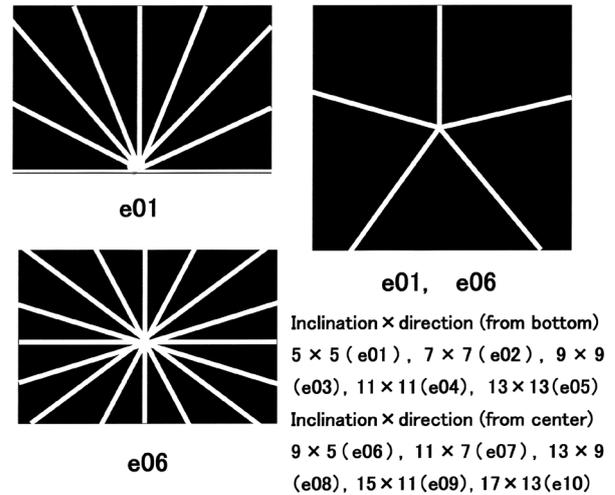


Fig. 5. Schematic showings of the eliminated areas (radial areas) viewed from the grid side surface (rectangle) or the grid upper surface (square) of in the e-type of partial deformation. The number of inclinations and directions of the radial areas were shown in the under right of the figure.

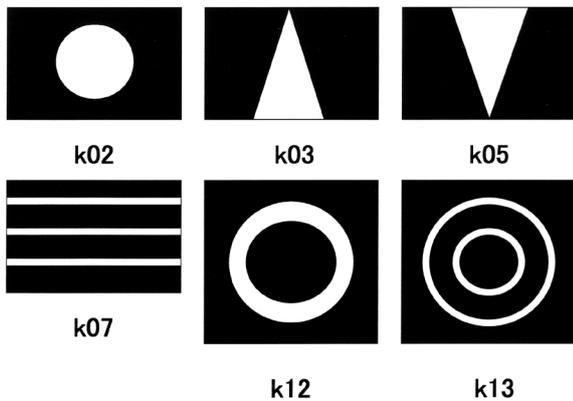


Fig. 3. Schematic showings of the eliminated areas viewed from the grid side surface (rectangle) or from upper surface (square) of the each treatment in the k-type of partial deformation.

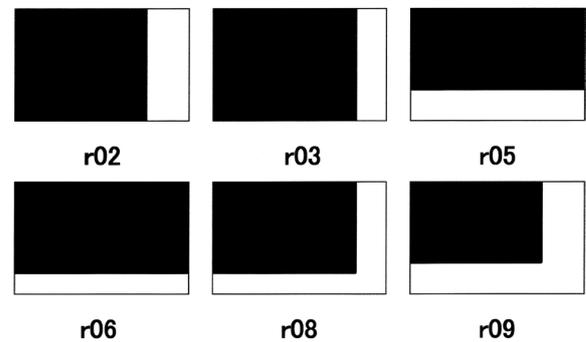


Fig. 6. Schematic showings of the eliminated areas viewed from the grid side of the r-type of partial deformation.

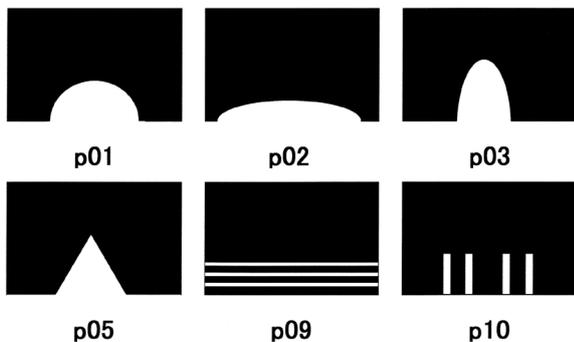


Fig. 4. Schematic showings of the eliminated areas viewed from the grid side surface of the each treatment in the p-type of partial deformation.

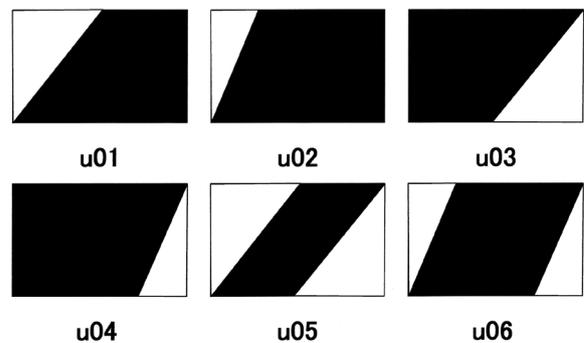


Fig. 7. Schematic showings of the eliminated areas viewed from the grid side of the u-type of partial deformation.

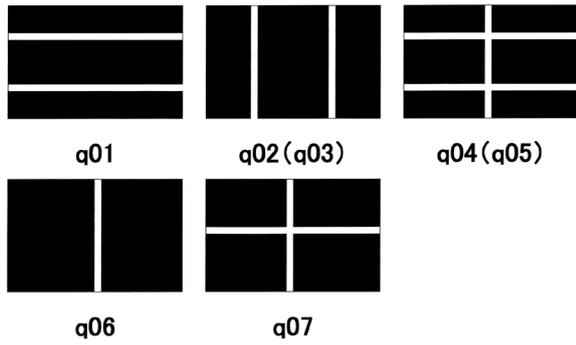


Fig. 8. Schematic showings of the eliminated areas viewed from the grid side of the q-type of partial deformation.

10) 類型i (大きな葉ブロック塊の除去を目的とした葉ブロックの再配置)

z処理タイプの樹冠を対象に、樹冠内の大きな葉ブロック塊を削除し、この部分を避けて乱数で樹冠内空ブロックに再配置した。このため以下のプログラム計算処理を施した。任意の1つの葉ブロック（当初葉ブロック）に隣接した合計26個のブロック（ $=3^3 - 1$ ，上段9個，中段8個および下段9個）を走査し、隣接葉ブロック数を計測した（第11図上）。次に、隣接葉ブロック数の大小に対応した後述の削除条件に沿って葉ブロック塊を削除し、この葉ブロック塊以外の空ブロックに再配置した。削除済みの葉ブロック塊を避けながら、上記計算処理を全葉ブロックについて繰り返した。葉ブロック塊を削除するときの条件は各処理方法により異なり、隣接葉ブロック数が3以上 (i03)，4以上 (i04)，5以上 (i05)，6以上 (i06)，7以上 (i07)，8以上 (i08)，9以上 (i09) および10以上 (i10) のとき削除した（第11図下および第2図のB01zi03）。なお、隣接葉ブロック数が11以上の葉ブロック塊は極めて珍しかったので、削除条件は10以上までとした。

11) 類型b (樹冠表層部の葉ブロック数割合の増大を目的とした葉ブロックの移動)

全樹冠形を対象に、以下のプログラム計算処理を施した。グリッドの上面、南面、北面、東面および西面の各網目から走査し（第12図）、最初の葉ブロックに遭遇したら、この葉ブロックを樹冠表層葉ブロックとし、次の網目に移った。全ての走査を終えた段階で、樹冠表層葉ブロック以外の葉ブロックを削除した。そのうえ、この削除部分を利用して、以下の2段階の方法で再配置した。最初、樹冠表層部葉ブロックの水平方向接触8ブロックのいずれかの空ブロックに乱数を用いて再配置し、全樹

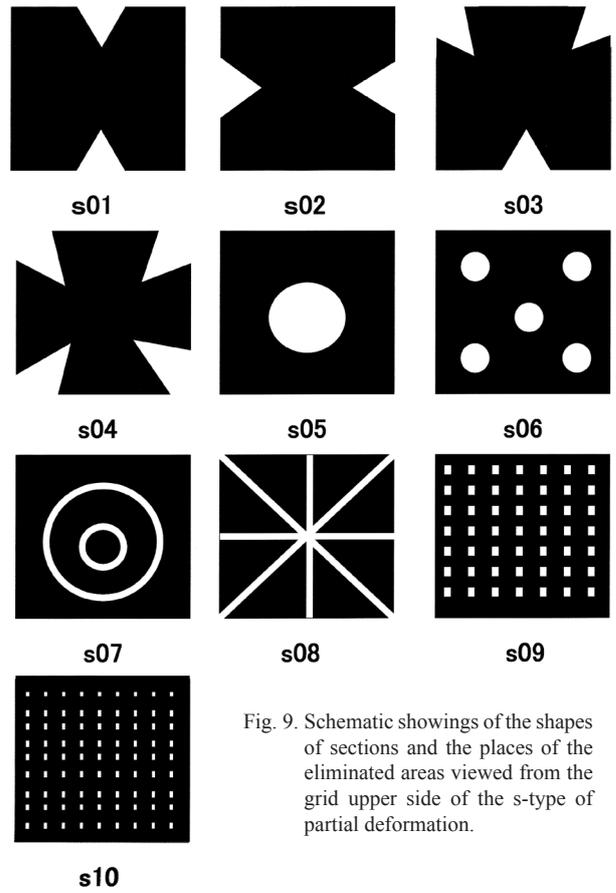


Fig. 9. Schematic showings of the shapes of sections and the places of the eliminated areas viewed from the grid upper side of the s-type of partial deformation.

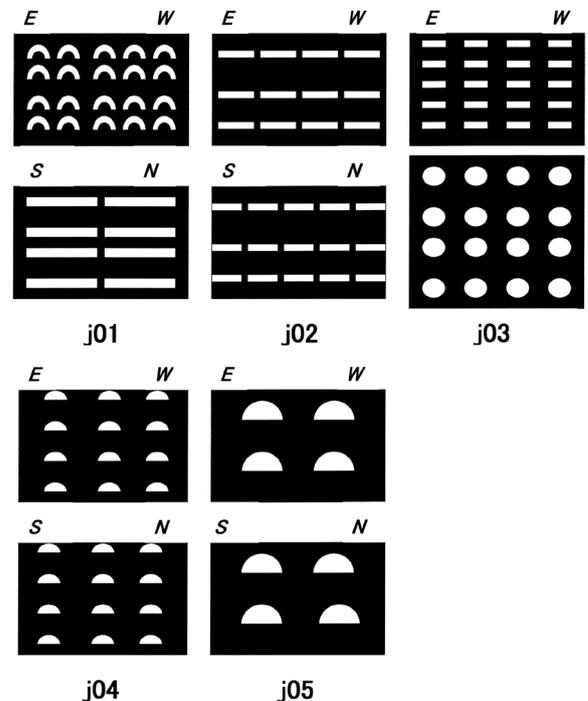
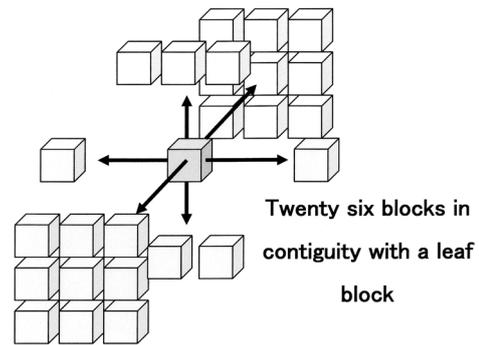


Fig.10. Schematic showings of the eliminated areas viewed from the grid side (rectangle) and the upper surface (square) of the j-type of partial deformation.

冠表層葉ブロックについてこの作業を繰り返した. 次に, 再配置用の空ブロックが不足した場合に限り, 樹冠表層葉ブロックの垂直方向接触8ブロックのいずれかの空ブロックに乱数を用いて再配置した (第12図). なお, 類型bでは変形方法は1種類であった (第2図のB01zb01).
 12) 類型m(投射光の地面漏れ防止を目的とした葉ブロックの移動)

全樹冠形を対象に, 以下のプログラム計算処理を施した. グリッド底面各網目から垂直方向に立てたブロック柱それぞれについて, これに含まれた葉ブロック数を合計し, 2個以上の葉ブロックを含むブロック柱 (処理対象葉ブロック柱) を識別した. 移動方法には次の2種類, すなわち, 処理対象葉ブロック柱から, 葉ブロックを含まぬ水平方向隣接ブロック柱に移動する場合および隣接に関係なく葉ブロックを含まぬブロック柱に移動する場合を設けた (第13図). 前者の移動数は各処理方法により異なり, 葉ブロック合計数-1 (m01), 葉ブロック合計数-2 (m02), 葉ブロック合計数-3 (m03), 葉ブロック合計数-4 (m04) および葉ブロック合計数-5 (m05) としたが, 移動先が不足したときは処理を停止し



Treatments (number of leaf blocks to eliminate)

- i03(>3), i04(>4), i05(>5), i06(>6),**
- i07(>7), i08(>8), i09(>9), i10(>10),**

Fig. 11. Schematic showings of scanning the 26 blocks in contiguity with a leaf block to investigate the size of leaf block agglomerate (upper), and the relationship between each treatment in the i-type of partial deformation and the limitative number of leaf block to eliminate in an agglomerate (in bracket, lower).

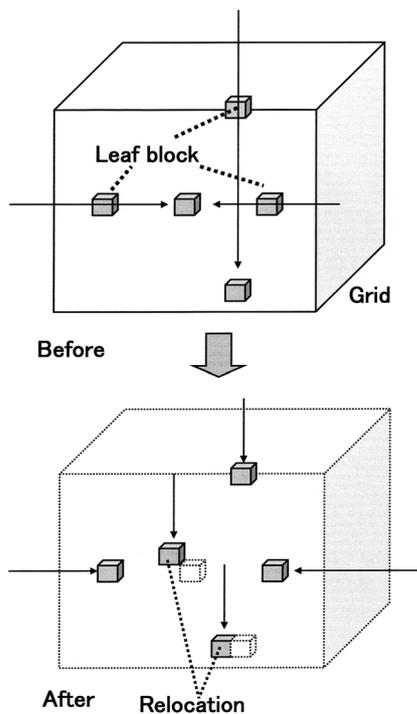


Fig. 12. Schematic showings of the b-type of partial deformation. The thin arrows indicated scanning directions to detect if a leaf block was a surface leaf block or not (upper). If a leaf block was not a surface leaf block, this leaf block was relocated to a near block to be a surface leaf block (lower).

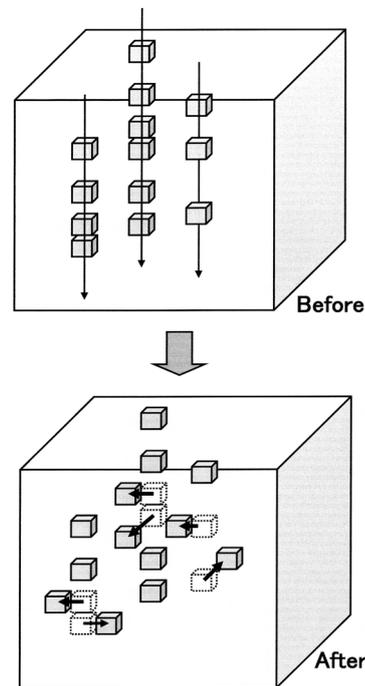


Fig. 13. Schematic showings of the m-type of partial deformation. The thin arrow indicated scanning direction to detect cumulative number of leaf block per longitudinal column (CN) in the grid (upper). The bold arrow indicated the relocation of a leaf block to an empty column to diminish the overlap of leaf blocks (lower). The number of relocated leaf blocks to the neighbor empty columns in the each treatment as follow; CN-1 (m01), CN-2 (m02), CN-3 (m03), CN-4 (m04) and CN-5 (m05), and that to the empty columns as follow; CN-1 (m06), CN-2 (m07), CN-3 (m08), CN- 4 (m09) and CN-5 (m10).

た（第13図および第2図のB01zm05）。また、後者の移動数も処理により異なり、葉ブロック合計数—1（m06）、葉ブロック合計数—2（m07）、葉ブロック合計数—3（m08）、葉ブロック合計数—4（m09）および葉ブロック合計数—5（m10）とした（第13図）。

13) 類型g（葉ブロックの過疎過密併存状態の部分的解消を目的とした葉ブロックの移動）

z処理タイプの樹冠に限定し、以下のプログラム計算処理を施した。グリッドをブロック数27個（ $=3 \times 3 \times 3$ ）の小立方体（合計245個）に分け、各小立方体内に含まれた葉ブロック数を数えた。全ての小立方体における葉ブロック数の平均値に比べて、葉ブロック数の多い小立方体から少ない小立方体へ葉ブロックを移動した（第14図）。この場合、移動元と移動先の葉ブロック数の差を算出し、この差の一定の割合を移動葉ブロック数とした。各処理方法によりこの割合は異なり、90%（g01）、85%（g02）、80%（g03）、75%（g04）、70%（g05）、65%（g06）、60%（g07）、55%（g08）、50%（g09）および45%（g10）とした（第14図および第2図のB01zg01）。

14) 類型x（回転処理）

割り当て空間の東西軸を回転中心軸として東を見ながら30度右回転および左回転の2種類の回転処理（縦回転）を施した（第15図および第2図B01zx03）。このほか、別種の回転処理（横回転）を施した。すなわち、割り当て空間の垂直軸を回転中心軸として天頂を見ながら回転したとき、回転角度を15度ずつずらしながら右回転処理および左回転処理を施した（合計22種類、第15図および第2図のB01zx18）。ただし、回転により割り当て空間を大きくはみ出す樹冠形の類型（A, C, I, J, R, UおよびM）については対象外とした。ちなみに、回転方向は時計針方向を右回転、反時計針方向を左回転とした（第15図）。なお、この回転処理により極く一部の葉ブロックが削除されたときは、乱数により再配置したことを断わっておく。

4. 光環境のシミュレーション実験と樹冠形状値の計算

本実験の目的は葉ブロック数を全く変えずに多様な部分的変形処理を施したうえに、果樹園光環境解析システム（山本, 1999, 以下, OLEAS）による光環境解析や樹冠形状値の計算（山本, 2015）を行った後に、これらの結果と変形処理前の光環境データや樹冠形状値とを比較することであった。変形処理前の光環境データや樹冠

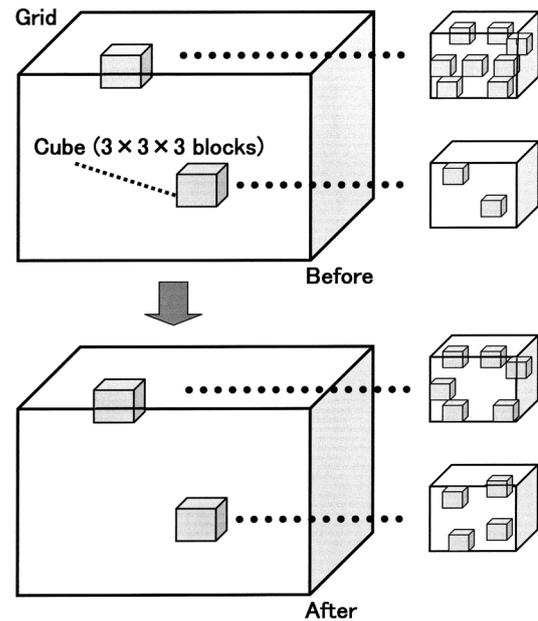


Fig. 14. Schematic showings of the g-type of partial deformation. The set space was divided into 245 cubes, where a cube contained 27 blocks. Number of leaf blocks in each cube (NLC) was counted. The relocation of leaf blocks from a denser cube to a diluter one was done in order to decrease the difference between the two. The arrangement of a relocated leaf block in a cube was decided using the random number. The number of relocated leaf blocks was differed by the each treatment, and decided by the next formula; a fixed proportion (%) \times the difference of NLC between the two cubes. Here, g01 (90%), g02 (85%), g03 (80%), g04 (75%), g05 (70%), g06 (65%) and g07 (60%).

形状値については既報（山本, 2016）で得られたものをそのまま使用した。したがって、変形処理後の果樹園光環境の解析作業についても、既報（山本, 2016）と同じ条件下で実施する必要があった。つまり、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）、等しい葉量、樹列方向は南北方向、樹間距離4mおよび樹列間距離6mの栽植距離、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）などの条件をそのまま用いた。用いたグリッドは4m \times 4m \times 4mの立方体、1辺を21分割したもので、樹高制限は18ブロック高（ ≈ 3.428 m）、樹冠底部制限高は3ブロック高（ ≈ 0.571 m）であった。また、用いた園地LAI（LAI₀ = 1.186）、7月下旬のリンゴ‘ふじ’の葉ブロック内葉密度平均値および個葉面積から逆算し、割り当て空間に656個の葉ブロックを配置したものであった（山本, 2016）。

果樹園光環境の主要な指標として、既報（山本, 2016）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 $\mu E \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ であった。さらに、前報(山本, 2016)と同様、樹冠内光環境の均一性、いわゆる‘明るさのむら’の程度を比較するために、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)平均値(平均変動係数, MCV)を用い、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した(山本, 2016)。

樹冠形状値の算出方法は既報(山本, 2015; 山本, 2016)に準じたが、分かりやすくするために、これらの内容と略号を簡単に補足説明しておきたい。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)、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)、東西方向葉ブロック連続数の平均値(MCFEW)、南北方向葉ブロック連

続数の平均値(MCFNS)、垂直方向透過度(TPVD)および3方向透過度(TP3D)であった(第3表上)。

光環境関連データを変形処理前後で比較するための指標として、例えば、処理前CDMPPFD(以下、CDMPPFDb)に対する処理後CDMPPFD(以下、CDMPPFDa)の比率にCDMPPFD比(=CDMPPFDa/CDMPPFDb, またはR1)を用いた。同様に、処理前ODMPPFD(ODMPPFDb)に対する処理後ODMPPFD(ODMPPFDa)の比率にODMPPFD比(=ODMPPFDa/ODMPPFDb, またはR2)、処理前CDMCV(CDMCVb)に対する処理後CDMCV(CDMCVa)の比率にCDMCV比(=CDMCVa/CDMCVb, またはR3)および処理前ODMCV(ODMCVb)に対する処理後ODMCV(ODMCVa)の比率にODMCV比(=ODMCVa/ODMCVb, またはR4)をそれぞれ用いた(第3表下)。この場合、CDMPPFD比とODMPPFD比が1以上で大きいほ

Table 3 Abbreviations and their units of characteristics of canopy shape (upper) and that of data related with orchard light environment (lower).

Abbre.	Contents	Units
PSLB	Proportion of surface leaf blocks for the total blocks	%
TPVD	Transmission proportion along vertical direction	%
LAIC	Leaf area index per land area occupied by a crown	%
PNLES	Proportion of leaves in enclosed space for the total	%
MCFVD	Mean continuation frequency of leaf block along vertical direction in a 3D grid	block
MCFNS	Mean continuation frequency of leaf block along north-south direction in a 3D grid	cm
MCFEW	Mean continuation frequency of leaf block along east-west direction in a 3D grid	cm
MNLBA	Mean number of blocks per leaf block agglomeration	block
MCTVD	Mean crown thickness along vertical direction	cm
MCT3D	Mean crown thickness along three directions	cm
TP3D	Transmission proportion along three directions	%
CDMPPFD	Daily mean of leaf PPFD on a clear day	$\mu E \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
ODMPPFD	Daily mean of leaf PPFD on an overcast day	$\mu E \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
CDMCV	Mean coefficient of variation of leaf PPFD on a clear day	%
ODMCV	Mean coefficient of variation of leaf PPFD on an overcast day	%
CDMPPFDb	CDMPPFD before partial deformation	$\mu E \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
ODMPPFDb	ODMPPFD before partial deformation	$\mu E \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
CDMCVb	CDMCV before partial deformation	%
ODMCVb	ODMCV before partial deformation	%
CDMPPFDa	CDMPPFD after partial deformation	$\mu E \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
ODMPPFDa	ODMPPFD after partial deformation	$\mu E \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
CDMCVa	CDMCV after partial deformation	%
ODMCVa	ODMCV after partial deformation	%
R1	CDMPPFDa/CDMPPFDb	
R2	ODMPPFDa/ODMPPFDb	
R3	CDMCVa/CDMCVb	
R4	ODMCVa/ODMCVb	
MEAN	Averaged value of grouped data	
MAX	Maximum value in grouped data	
MIN	Minimum value in grouped data	
STD	Standard deviation of grouped data	

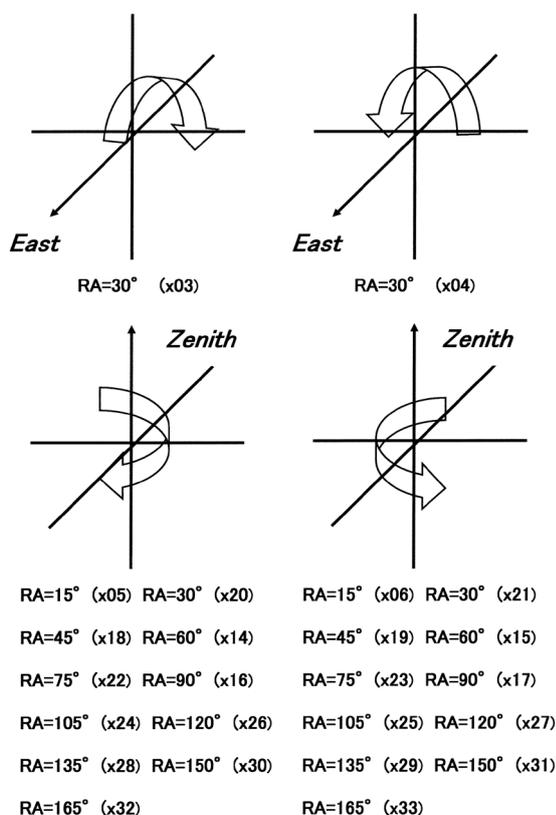


Fig. 15. Schematic showings of the x-type of partial deformation using several rotation angles (RAs). The rotation around East-West axis using the two RAs (upper), and that around the earth-zenith axis using the 22 RAs (lower).

ど光環境改善効果が大きいことを意味した。また、CDMCV比とODMCV比が1以下で小さいほど樹冠内光環境の均一性における改善効果が大きいことを意味した。

樹冠形状値についても、処理前の樹冠形状値に対する処理後の樹冠形状値の比率を用いた。ちなみに、処理前のLAIC (LAICb) に対する処理後のLAIC (LAICa) の比率にはLAICの比(= LAICa/ LAICb)を用いた(他の樹冠形状値の比についても同様)。

結 果

1. 変形処理の組み合わせ総数および変形処理効果の概要

全ての変形処理と処理対象樹冠形を組み合わせた結果、組合せが実現した数は合計52,378であった(第4表)。全データにおけるCDMPPFD比およびODMPPFD比の平均値はいずれも1を超え、最大値は、それぞれ、1.545および1.361であった(第4表)。また、CDMCV比およ

びODMCV比の平均値はいずれも1以下であり、最小値は、それぞれ、0.667および0.642であった(第4表)。

処理前CDMPPFD (CDMPPFDb) と処理後CDMPPFD (CDMPPFDa) の散布図(第16図左上)を作成したところ、CDMPPFDbが大きいところではCDMPPFDaは1:1線(斜線)近辺あるいはこれ以下に分布し(以下、頭打ち現象)、CDMPPFDbが小さいところではCDMPPFDaは1:1線(斜線)より上に分布した(以下、挽回現象)。この傾向はCDMPPFDbが小さいほど顕著であった(第16図左上)。それから、処理前ODMPPFD (ODMPPFDb) と処理後ODMPPFD

Table 4 The statics of the ratios of orchard light environments data after the all partial deformations for that before. The abbreviations refer to Table 3.

	MEAN	MAX	MIN	STD	n
CDMPPFDa/CDMPPFDb	1.027	1.545	0.826	0.043	52378
ODMPPFDa/ODMPPFDb	1.019	1.361	0.815	0.027	52378
CDMCVa/CDMCVb	0.984	1.292	0.667	0.036	52378
ODMCVa/ODMCVb	0.991	1.195	0.642	0.025	52378

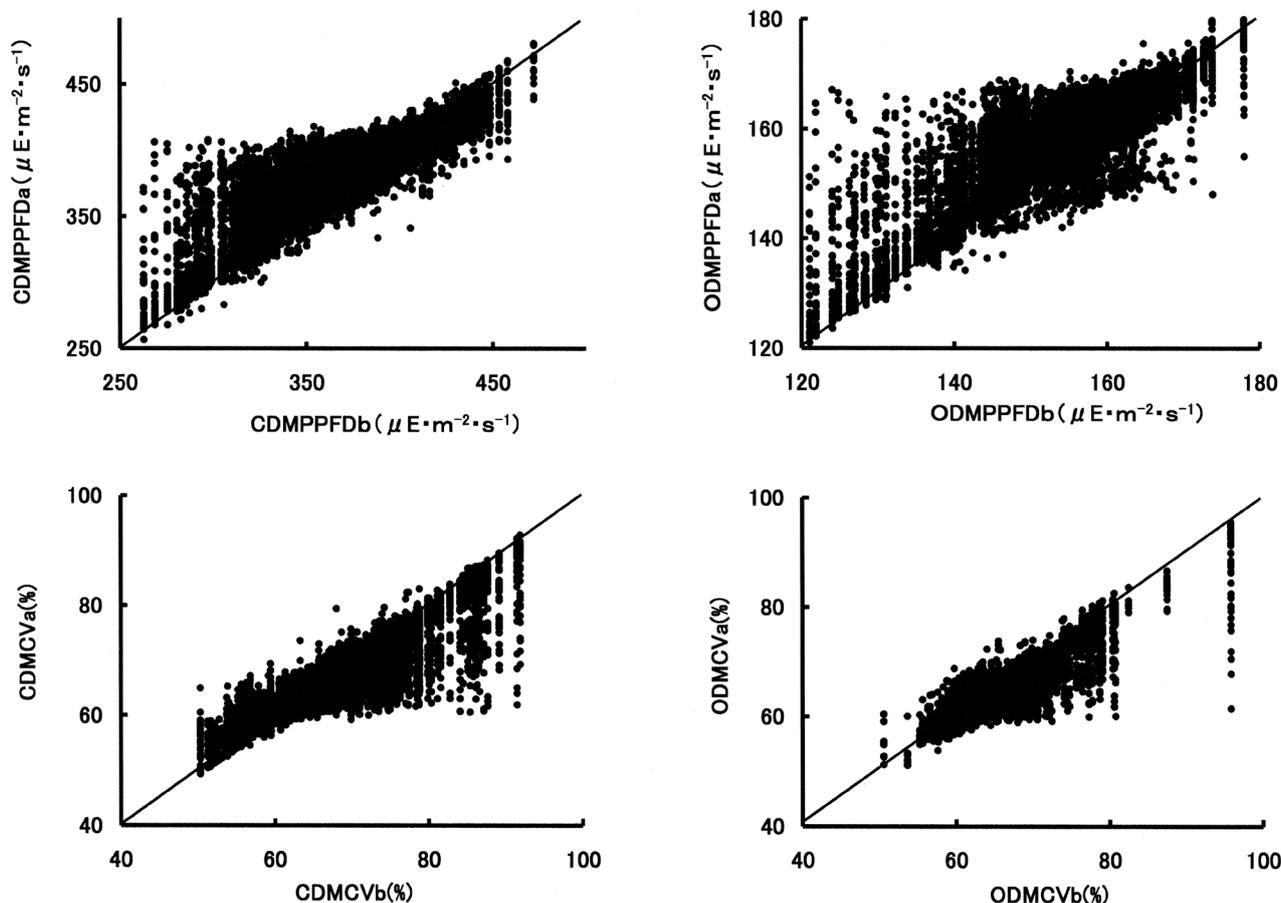


Fig. 16. Relationships between the light environment data between before the partial deformation and that after. The abbreviations refer to Table 3. The slant lines indicate 1:1 lines.

(ODMPPFDa) の散布図 (第16図右上) にも上記と似た傾向が認められた。一方, 処理前CDMCV (CDMCVb) と処理後CDMCV (CDMCVa) の散布図 (第16図左下) から, CDMCVbが小さいところではCDMCVaは1:1線 (斜線) 近辺あるいはこれ以上に分布し (頭打ち現象), CDMCVbが大きいところではCDMCVaは1:1線 (斜線) より下に分布した (挽回現象), この傾向はCDMCVbが大きいほど顕著であった (第16図左下)。また, 処理前ODMCV (ODMCVb) と処理後ODMCV (ODMCVa) の散布図 (第16図右下) にも上記と似た傾向が認められた。けれども, これらの傾向は変形処理方法や処理対象樹冠形の違いなどの多くの要因が混在したデータに見られたことから, 各要因別に解析する必要があった。

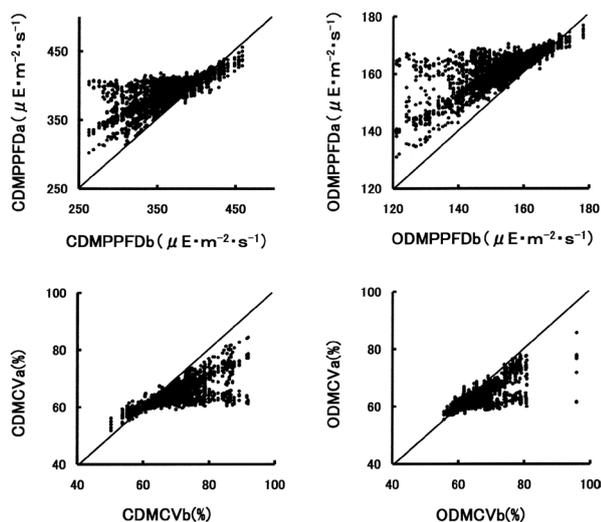


Fig. 17. Relationships between the light environmental data before the h-type of partial deformation and that after. The abbreviations refer to Table 3. The slant lines indicate 1:1 relations.

Table 5 Correlations between light environmental data (R1, R2, R3 and R4) of the h-type of partial deformation treatments and the proportions of values of characteristics of canopy shape after the treatment to that before. In the latter, suffix "a" and "b" denotes "after treatment" and "before treatment", respectively. The abbreviations refer to Table 3. n=4560.

	R1	R2	R3	R4
PSLBa / PSLBb	0.5904 **z	0.6197 **	-0.5701 **	-0.5157 **
TPVDa / TPVDb	-0.2013 **	-0.0916 **	0.2671 **	-0.0322 *
LAICa / LAICb	-0.6322 **	-0.3624 **	0.5660 **	0.0138
PNLESa / PNLEsb	-0.0715 **	-0.0350 *	0.0785 **	-0.0001
MCFVDa / MCFVDb	-0.6398 **	-0.5875 **	0.5346 **	0.3077 **
MCFNSa / MCFNSb	-0.2614 **	-0.3694 **	0.1922 **	0.3806 **
MCFEwa / MCFEWb	-0.2616 **	-0.3767 **	0.1852 **	0.3350 **
MNLBAa / MNLBAb	-0.5973 **	-0.5399 **	0.4881 **	0.2500 **
MCTVda / MCTVDb	-0.2742 **	0.0191	0.2857 **	-0.2138 **
MCT3Da / MCT3Db	0.2479 **	0.3477 **	-0.3426 **	-0.3886 **
TP3Da / TP3Db	-0.6386 **	-0.6138 **	0.6225 **	0.4228 **

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

2. 変形処理の各類型における光環境改善効果の特徴

1) 類型hの特徴

類型h (指定領域内葉ブロック数の減少) の変形処理により, CDMPPFD, ODMPPFD, CDMCVおよびODMCVの各散布図 (第17図) と同様に, 1. に記した挽回現象と頭打ち現象が顕著に見られた。この原因を明らかにするため, 光環境関連データの処理前後の比率 (CDMPPFD比, ODMPPFD比, CDMCV比およびODMCV比) と各樹冠形状値の処理前後の比率との間の相関関係を調査したところ, 3方向透過度 (TP3D) の比, 上下方向葉ブロック連続数平均値 (MCFVD) の比, 樹冠表面葉ブロック割合 (PSLB) の比, 葉塊当たり葉ブロック数平均値 (MNLBA) の比などの間に高い相関が認められた (第

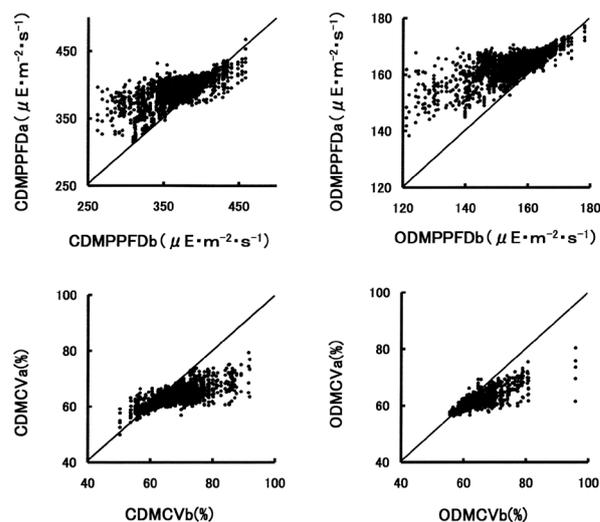


Fig. 18. Relationships between the light environmental data before the k-type of partial deformation and that after. The abbreviations refer to Table 3. The slant lines indicate 1:1 relations.

Table 6 Correlations between light environmental data of the k-type of partial deformation treatments and the proportions of values of characteristics of canopy shape after the treatment to that before. The abbreviations refer to Table 3 and Table 5. n=2687.

	R1	R2	R3	R4
PSLBa / PSLBb	0.5369 **z	0.5701 **	-0.5312 **	-0.4789 **
TPVDa / TPVDb	-0.2229 **	-0.1136 **	0.2900 **	-0.0257
LAICa / LAICb	-0.6486 **	-0.4288 **	0.5899 **	0.0818 **
PNLESa / PNLEsb	-0.0641 **	-0.0412 *	0.0676 **	0.0105
MCFVDa / MCFVDb	-0.6561 **	-0.6085 **	0.5430 **	0.3356 **
MCFNSa / MCFNSb	-0.2695 **	-0.4186 **	0.2113 **	0.4322 **
MCFEwa / MCFEWb	-0.2621 **	-0.4023 **	0.1924 **	0.3580 **
MNLBAa / MNLBAb	-0.6264 **	-0.5860 **	0.5132 **	0.3074 **
MCTVda / MCTVDb	-0.3479 **	-0.0695 **	0.3697 **	-0.1645 **
MCT3Da / MCT3Db	0.2433 **	0.3253 **	-0.3201 **	-0.3870 **
TP3Da / TP3Db	-0.6708 **	-0.6608 **	0.6576 **	0.4556 **

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

5表). また, 晴天日に限り, 樹冠占有面積当たり葉面積指数 (LAIC) の比の間の相関が高かった (第5表).

2) 類型kの特徴

類型k (割り当て空間中央部における指定領域内葉ブロックの削除) の変形処理により, 光環境関連データの各散布図 (第18図) と同様に, 挽回現象と頭打ち現象が顕著に見られた. 1) と同様に相関関係を調査したところ, 3方向透過度 (TP3D) の比, 上下方向葉ブロック連続数平均値 (MCFVD) の比, 樹冠表面葉ブロック数割合 (PSLB) の比, 葉塊当たり葉ブロック数平均値 (MNLBA) の比との間に高い相関が認められた (第6表). また, 晴天日に限り, 樹冠占有面積当たり葉面積指数 (LAIC) との間の相関が高かった (第6表).

3) 類型pの特徴

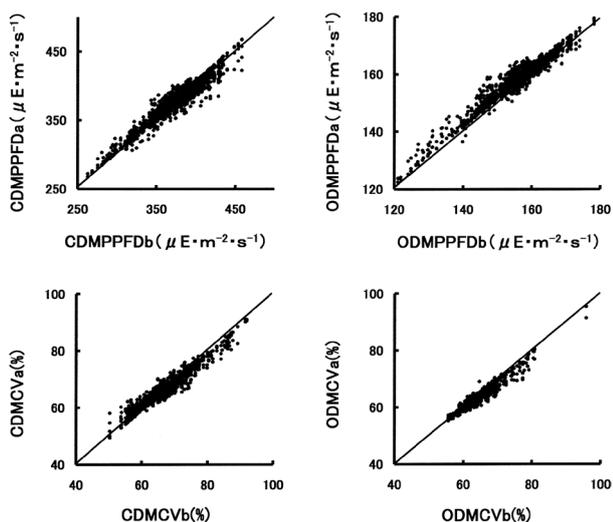


Fig. 19. Relationships between the light environmental data before the p-type of partial deformation and that after. The abbreviations refer to Table 3. The slant lines indicate 1:1 relations.

Table 7 Correlations between light environmental data of the p-type of partial deformation treatments and the proportions of values of characteristics of canopy shape after the treatment to that before. The abbreviations refer to Table 3 and Table 5. n=2327.

	R1	R2	R3	R4
PSLBa / PSLBb	-0.0994 **z	-0.0692 **	0.0550 **	-0.0147
TPVDa / TPVDb	-0.2802 **	-0.1481 **	0.3462 **	-0.0057
LAICa / LAICb	-0.4126 **	-0.2156 **	0.3818 **	-0.0951 **
PNLESa / PNLESb	-0.0629 **	-0.0353	0.0569 **	0.0054
MCFVDa / MCFVDb	-0.3347 **	0.0130	0.2412 **	-0.2032 **
MCFNSa / MCFNSb	0.3791 **	0.1838 **	-0.3712 **	0.0721 **
MCFEwa / MCFEWb	0.3264 **	0.1663 **	-0.3243 **	0.0538 **
MNLBAa / MNLBAb	-0.3287 **	-0.0051	0.2307 **	-0.1813 **
MCTVda / MCTVdb	-0.1751 **	-0.2175 **	0.2539 **	0.0717 **
MCT3Da / MCT3Db	0.1351 **	0.1756 **	-0.1170 **	-0.1713 **
TP3Da / TP3Db	-0.1736 **	-0.1237 **	0.2003 **	0.0193

^z** indicates significance at 1% level.

類型p (割り当て空間底部における指定領域内葉ブロックの削除) の変形処理では, 指定領域が底部に限られ, 上部が閉じたことにより, 光環境改善効果は全類型を通じて特に劣った. それゆえに, 光環境関連データの各散布図 (第19図) と同様に, 挽回現象と頭打ち現象は弱かった. 1) と同様に相関関係を調査したところ, いずれの樹冠形状値の比率との間の相関は低かった (第7表).

4) 類型eの特徴

類型e (割り当て空間底部あるいは中心部からの放射状領域内葉ブロックの削除) の変形処理により, 光環境関連データの各散布図 (第20図) と同様に, 挽回現象と頭打ち現象が僅かに見られた. 1) と同様に相関関係を調査したところ, 3方向透過度 (TP3D) の比, 上下方向葉ブロック連続数平均値 (MCFVD) の比, 葉塊当たり

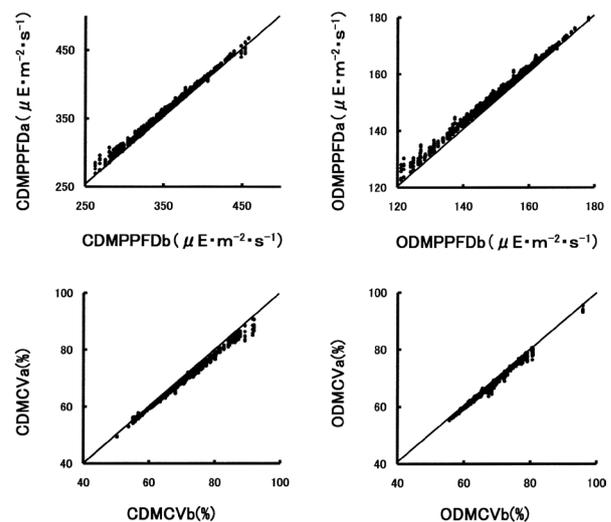


Fig. 20. Relationships between the light environmental data before the e-type of partial deformation and that after. The abbreviations refer to Table 3. The slant lines indicate 1:1 relations.

Table 8 Correlations between light environmental data of the e-type of partial deformation treatments and the proportions of values of characteristics of canopy shape after the treatment to that before. The abbreviations refer to Table 3 and Table 5. n=4560.

	R1	R2	R3	R4
PSLBa / PSLBb	0.4350 **z	0.4797 **	-0.3901 **	-0.2952 **
TPVDa / TPVDb	-0.1971 **	0.0453 **	0.1964 **	-0.3097 **
LAICa / LAICb	-0.6497 **	-0.4754 **	0.5441 **	0.0931 **
PNLESa / PNLESb	-0.0522 **	-0.0320 *	0.0456 **	0.0192
MCFVDa / MCFVDb	-0.6203 **	-0.6084 **	0.5183 **	0.3101 **
MCFNSa / MCFNSb	-0.2350 **	-0.4410 **	0.1591 **	0.3813 **
MCFEwa / MCFEWb	-0.2147 **	-0.4274 **	0.1435 **	0.3505 **
MNLBAa / MNLBAb	-0.5263 **	-0.5373 **	0.4359 **	0.2812 **
MCTVda / MCTVdb	-0.4012 **	-0.0818 **	0.3415 **	-0.2237 **
MCT3Da / MCT3Db	-0.1312 **	-0.2594 **	0.0645 **	0.2071 **
TP3Da / TP3Db	-0.5530 **	-0.6316 **	0.5001 **	0.3895 **

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

葉ブロック数平均値 (MNLBA) の比などとの間に高い相関が認められた (第8表).

5) 類型 r の特徴

類型 r (割り当て空間の北側一部, 下側一部あるいはこの両者の葉ブロックの削除) の変形処理により, 光環境関連データの各散布図 (第21図) とともに, 挽回現象と頭打ち現象が見られた. 1) と同様に相関関係を調査したところ, 晴天日に限り樹冠占有面積当たり葉面積指数 (LAIC) の比および上下方向の樹冠厚平均値 (MCTVD) の比の間に高い相関が認められた (第9表).

6) 類型 u の特徴

類型 u (割り当て空間の南側, 北側あるいはこの両者を斜めに切り取ってできる領域内葉ブロックの削除) の変形処理により, 光環境関連データの各散布図 (第22図)

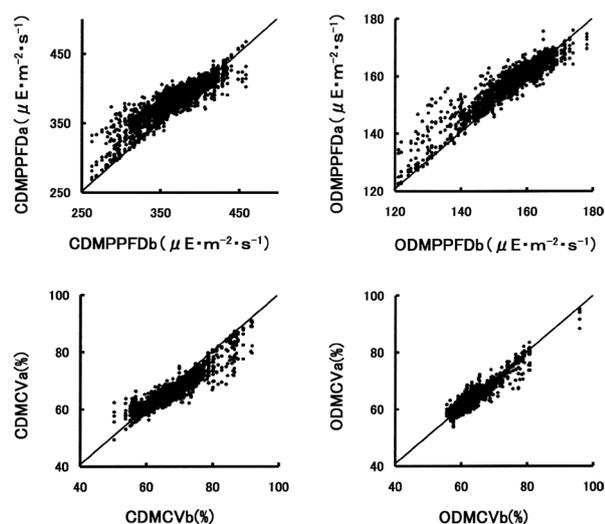


Fig. 21. Relationships between the light environmental data before the r-type of partial deformation and that after. The abbreviations refer to Table 3. The slant lines indicate 1:1 relations.

Table 9 Correlations between light environmental data of the r-type of partial deformation treatments and the proportions of values of characteristics of canopy shape after the treatment to that before. The abbreviations refer to Table 3 and Table 5. n=2690.

	R1	R2	R3	R4
PSLBa / PSLBb	0.1268 **z	-0.0039	-0.0539 **	0.1165 **
TPVda / TPVdb	-0.2584 **	-0.1128 **	0.3658 **	-0.1022 **
LAICa / LAICb	-0.6653 **	-0.2894 **	0.5492 **	-0.3261 **
PNLESa / PNLESb	-0.0747 **	-0.0109	0.0802 **	-0.0404 *
MCFVda / MCFVdb	-0.4126 **	-0.3912 **	0.2326 **	-0.0924 **
MCFNSa / MCFNSb	-0.0291	-0.0675 **	-0.1190 **	0.0504 **
MCFEwa / MCFEWb	-0.0210	-0.1487 **	-0.1152 **	0.0510 **
MNLBAa / MNLBAb	-0.3748 **	-0.3576 **	0.1856 **	-0.1085 **
MCTVda / MCTVdb	-0.5515 **	-0.1566 **	0.5707 **	-0.2755 **
MCT3Da / MCT3Db	0.0787 **	0.1931 **	-0.2157 **	-0.2524 **
TP3Da / TP3Db	-0.3283 **	-0.1665 **	0.1828 **	-0.1924 **

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

とも, 挽回現象と頭打ち現象が見られた. 1) と同様に相関関係を調査したところ, 晴天日に限り樹冠占有面積当たり葉面積指数 (LAIC) の比および上下方向の樹冠厚平均値 (MCTVD) の比との間に高い相関が認められた (第10表).

7) 類型 q の特徴

類型 q (割り当て空間のグリッド網目に沿ったスライス状あるいは格子状の領域内葉ブロックの削除) の変形処理により, 光環境関連データの各散布図 (第23図) とともに, 挽回現象と頭打ち現象が僅かに見られた. 1) と同様に相関関係を調査したところ, 晴天日に限り樹冠占有面積当たり葉面積指数 (LAIC) の比および垂直方向透過度 (TPVD) の比との間にやや高い相関が認められた (第11表).

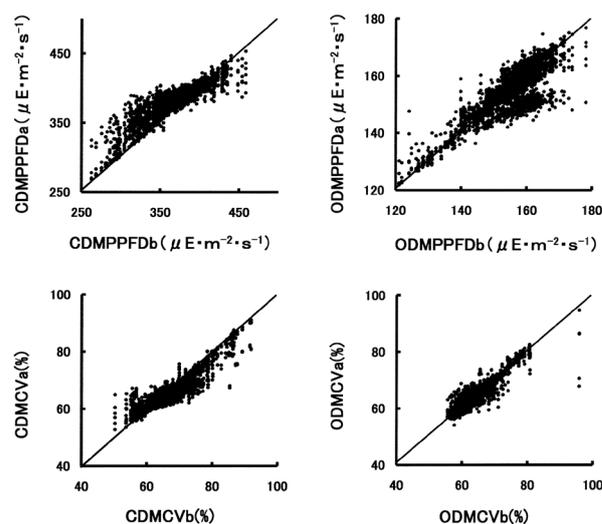


Fig. 22. Relationships between the light environmental data before the u-type of partial deformation and that after. The abbreviations refer to Table 3. The slant lines indicate 1:1 relations.

Table 10 Correlations between light environmental data of the u-type of partial deformation treatments and the proportions of values of characteristics of canopy shape after the treatment to that before. The abbreviations refer to Table 3 and Table 5. n=2736.

	R1	R2	R3	R4
PSLBa / PSLBb	0.1065 **z	-0.0509 **	-0.0840 **	0.0345
TPVda / TPVdb	-0.3021 **	-0.1397 **	0.4132 **	-0.0198
LAICa / LAICb	-0.6614 **	-0.1180 **	0.5543 **	-0.1590 **
PNLESa / PNLESb	-0.0858 **	-0.0496 **	0.0963 **	-0.0042
MCFVda / MCFVdb	-0.3825 **	-0.2085 **	0.1953 **	-0.0783 **
MCFNSa / MCFNSb	0.0185	0.0718 **	-0.1012 **	0.1106 **
MCFEwa / MCFEWb	0.0084	-0.0478 **	-0.0887 **	0.1057 **
MNLBAa / MNLBAb	-0.3370 **	-0.3226 **	0.1655 **	-0.0039
MCTVda / MCTVdb	-0.5025 **	0.0474 **	0.5207 **	-0.1655 **
MCT3Da / MCT3Db	0.0469 **	-0.0568 **	-0.1287 **	-0.0408 **
TP3Da / TP3Db	-0.3510 **	-0.2065 **	0.2845 **	0.0617 **

z ** indicates significance at 1% and 5% level.

8) 類型sの特徴

類型s（割り当て区画内で様々な断面形を用いて垂直状に切り取った領域内葉ブロックの削除）の変形処理により，光環境関連データの各散布図（第24図）とも，挽回現象と頭打ち現象は弱かった．1）と同様に相関関係を調査したところ，晴天日に限り樹冠占有面積当たり葉面積指数（LAIC）の比および垂直方向透過度（TPVD）の比との間にやや高い相関が認められた（第12表）．

9) 類型jの特徴

類型j（割り当て空間内に等間隔に散在する単純立体内葉ブロックの削除）の変形処理により，光環境関連データの各散布図（第25図）とも，挽回現象と頭打ち現象は弱かった．1）と同様に相関関係を調査したところ，晴天日に上下方向葉ブロック連続数平均値

（MCFVD）の比，南北方向葉ブロック連続数平均値（MCFNS）の比および東西方向葉ブロック連続数平均値（MCFEW）の比の間にやや高い相関が認められた（第13表）．

10) 類型iの特徴

類型i（大きな葉ブロック塊の除去）の変形処理により，光環境関連データの各散布図（第26図）とも，挽回現象と頭打ち現象が僅かに認められた．1）と同様に相関関係を調査したところ，樹冠表面葉ブロック数割合（PSLB）の比との間にやや高い相関が認められた（第14表）．また，晴天日に限り，樹冠占有面積当たり葉面積指数（LAIC）の比や3方向の樹冠厚平均値（MCT3D）の比の間にやや高い相関が認められた（第14表）．

11) 類型bの特徴

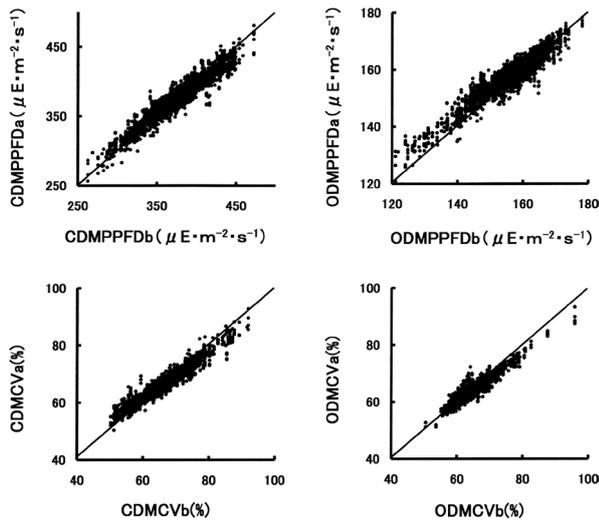


Fig. 23. Relationships between the light environmental data before the q-type of partial deformation and that after. The abbreviations refer to Table 3. The slant lines indicate 1:1 relations.

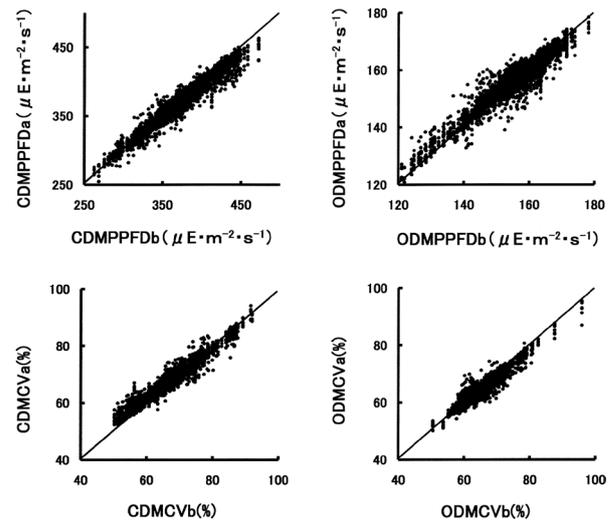


Fig. 24. Relationships between the light environmental data before the s-type of partial deformation and that after. The abbreviations refer to Table 3. The slant lines indicate 1:1 relations.

Table 11 Correlations between light environmental data of the q-type of partial deformation treatments and the proportions of values of characteristics of canopy shape after the treatment to that before. The abbreviations refer to Table 3 and Table 5. n=3450.

	R1	R2	R3	R4
PSLBa / PSLBb	0.0957 **z	0.1175 **	-0.1927 **	-0.1514 **
TPVDa / TPVDb	-0.4084 **	-0.2816 **	0.5584 **	0.1380 **
LAICa / LAICb	-0.5540 **	-0.2032 **	0.4501 **	-0.1602 **
PNLESa / PNLESb	0.0399 *	0.0015	-0.0404 *	-0.0891 **
MCFVDa / MCFVDb	-0.3115 **	-0.1207 **	0.2433 **	-0.0029
MCFNSa / MCFNSb	0.2162 **	0.1958 **	-0.2474 **	0.0087
MCFEWa / MCFEWb	0.2566 **	0.0679 **	-0.2516 **	0.0767 **
MNLBaa / MNLBAb	-0.2915 **	-0.1022 **	0.2163 **	-0.0308
MCTVDa / MCTVDb	-0.3608 **	-0.1765 **	0.3928 **	-0.0659 **
MCT3Da / MCT3Db	0.0231	0.0710 **	0.0149	-0.0233
TP3Da / TP3Db	-0.2411 **	-0.1654 **	0.3033 **	0.1010 **

z ** and * indicates significance at 1% and 5% level.

Table 12 Correlations between light environmental data of the s-type of partial deformation treatments and the proportions of values of characteristics of canopy shape after the treatment to that before. The abbreviations refer to Table 3 and Table 5. n=5087.

	R1	R2	R3	R4
PSLBa / PSLBb	0.1320 **z	0.0942 **	-0.1825 **	-0.0611 **
TPVDa / TPVDb	-0.4073 **	-0.2516 **	0.5479 **	0.1210 **
LAICa / LAICb	-0.4424 **	-0.1029 **	0.3821 **	-0.1108 **
PNLESa / PNLESb	-0.0115	-0.0105	-0.0115	-0.1023 **
MCFVDa / MCFVDb	-0.2559 **	0.0195	0.1845 **	-0.1061 **
MCFNSa / MCFNSb	0.1227 **	0.0619 **	-0.2220 **	0.0440 **
MCFEWa / MCFEWb	0.1103 **	0.0628 **	-0.2173 **	-0.0283 **
MNLBaa / MNLBAb	-0.2545 **	0.0048	0.1766 **	-0.1067 **
MCTVDa / MCTVDb	-0.3396 **	-0.1613 **	0.3769 **	-0.0386 **
MCT3Da / MCT3Db	-0.0047	0.1294 **	0.0049	-0.1242 **
TP3Da / TP3Db	-0.3095 **	-0.1429 **	0.3237 **	0.0073

z ** indicates significance at 1% and 5% level.

類型b (樹冠表層部の葉ブロック数割合の増大を目的とした葉ブロックの移動) の変形処理により, 光環境関連データの各散布図 (第27図) と同様に相関関係を調査したところ, 晴天日に限り, 3方向透過度 (TP3D) の比, 樹冠占有面積当たり葉面積指数 (LAIC) の比, 垂直方向の透過度 (TPVD) の比との間に高い相関が認められ, また, 樹冠表面葉ブロック数割合 (PSLB) の比にやや高い相関が認められた (第15表).

12) 類型mの特徴

類型m (投射光の地面漏れ防止を目的とした樹冠内葉ブロックの移動) の変形処理により, 光環境関連データの各散布図 (第28図) と同様に相関関係を調査したところ, 晴天日に限り, 3方向透過度 (TP3D) の比, 樹冠占有面積当たり葉面積指数 (LAIC) の比, 垂直方向の透過度 (TPVD) の比との間に高い相関が認められ, また, 樹冠表面葉ブロック数割合 (PSLB) の比にやや高い相関が認められた (第15表).

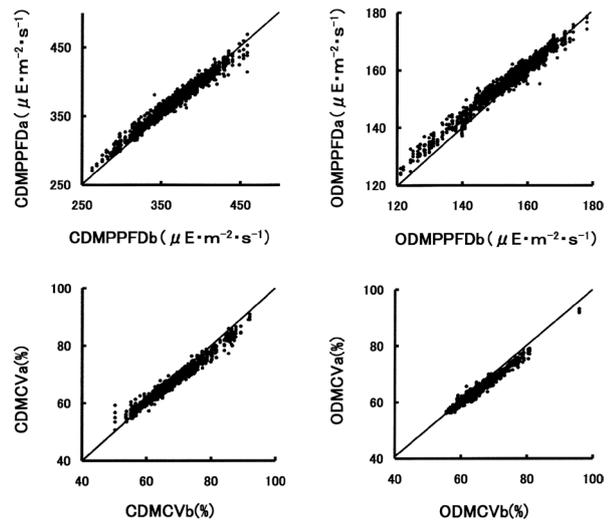


Fig. 25. Relationships between the light environmental data before the j-type of partial deformation and that after. The abbreviations refer to Table 3. The slant lines indicate 1:1 relations.

Table 13 Correlations between light environmental data of the j-type of partial deformation treatments and the proportions of values of characteristics of canopy shape after the treatment to that before. The abbreviations refer to Table 3 and Table 5. n=2243.

	R1	R2	R3	R4
PSLBa / PSLBb	-0.1917 **z	-0.1658 **	0.1468 **	0.0048
TPVDa / TPVDb	-0.2631 **	-0.1633 **	0.3777 **	0.0391
LAICa / LAICb	-0.3641 **	-0.1977 **	0.3375 **	-0.0433 *
PNLESa / PNLESb	-0.0515 *	-0.0389	0.0470 *	0.0091
MCFVDa / MCFVDb	-0.5248 **	-0.3498 **	0.4273 **	0.0718 **
MCFNSa / MCFNSb	0.4308 **	0.2591 **	-0.4413 **	0.0413
MCFEWa / MCFEWb	0.4120 **	0.2865 **	-0.4233 **	-0.0530 *
MNLBAa / MNLBAb	-0.4685 **	-0.2879 **	0.3684 **	0.0029
MCTVDa / MCTVDb	-0.0001	0.0561 **	0.0769 **	-0.0841 **
MCT3Da / MCT3Db	0.3337 **	0.3584 **	-0.3152 **	-0.2068 **
TP3Da / TP3Db	0.0614 **	0.0384	-0.0140	0.0450 *

z ** and * indicates significance at 1% and 5% level.

る, CDMPPFD比, ODMPPFD比およびCDMCV比に限り, 3方向透過度 (TP3D) の比, 樹冠占有面積当たり葉面積指数 (LAIC) の比, 上下方向葉ブロック連続数の平均値 (MCFVD) の比, 東西方向はブロック連続数の平均値 (MCFEW) の比, 南北方向葉ブロック連続数の平均値 (MCFNS) の比, 垂直方向の樹冠厚平均値 (MCTVD) の比の間に高い相関が認められた (第16表).

13) 類型gの特徴

類型g (葉ブロックの過疎過密併存状態の部分的解消を目的とした葉ブロックの移動) の変形処理により, 光環境関連データの各散布図 (第29図) と同様に相関関係を調査したところ, 樹冠表面葉ブロック数割合 (PSLB) の比および3方向の樹冠厚平均値 (MCT3D) の比の間

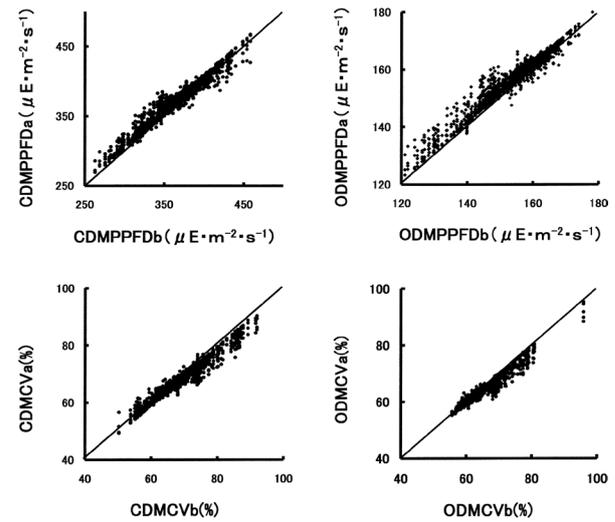


Fig. 26. Relationships between the light environmental data before the i-type of partial deformation and that after. The abbreviations refer to Table 3. The slant lines indicate 1:1 relations.

Table 14 Correlations between light environmental data of the i-type of partial deformation treatments and the proportions of values of characteristics of canopy shape after the treatment to that before. The abbreviations refer to Table 3 and Table 5. n=3337.

	R1	R2	R3	R4
PSLBa / PSLBb	0.3709 **z	0.4603 **	-0.3256 **	-0.4611 **
TPVDa / TPVDb	-0.2520 **	-0.0940 **	0.3023 **	-0.0055
LAICa / LAICb	-0.4305 **	-0.2727 **	0.3835 **	0.1155 **
PNLESa / PNLESb	-0.0332	-0.0114	0.0221	-0.0002
MCFVDa / MCFVDb	-0.3729 **	-0.1661 **	0.3658 **	0.0080
MCFNSa / MCFNSb	0.0139	-0.1869 **	-0.0912 **	0.3015 **
MCFEWa / MCFEWb	0.0032	-0.1693 **	-0.0668 **	0.2786 **
MNLBAa / MNLBAb	-0.2628 **	-0.0509 **	0.2589 **	-0.1206 **
MCTVDa / MCTVDb	-0.0611 **	-0.0712 **	0.0563 **	0.0735 **
MCT3Da / MCT3Db	0.3758 **	0.3250 **	-0.4117 **	-0.2260 **
TP3Da / TP3Db	-0.3129 **	-0.3517 **	0.2613 **	0.3097 **

z ** indicates significance at 1% level.

に高い相関が認められた（第17表）。しかも、晴天日に限り、樹冠占有面積当たり葉面積指数（LAIC）の比、上下方向はブロック連続数の平均値（MCFVD）の比、3方向透過度（TP3D）の比の間にやや高い相関が認められた（第17表）。

14) 類型xの特徴

類型x（回転処理）の変形処理により、光環境関連データの各散布図（第30図）とも、挽回現象と頭打ち現象が認められた。1）と同様に相関関係を調査したところ、晴天日に限り、樹冠占有面積当たり葉面積指数（LAIC）の比、上下方向はブロック連続数の平均値（MCFVD）の比および葉塊当たり葉ブロック数平均値（MNLBA）の比の間に高い相関が認められた（第18表）。

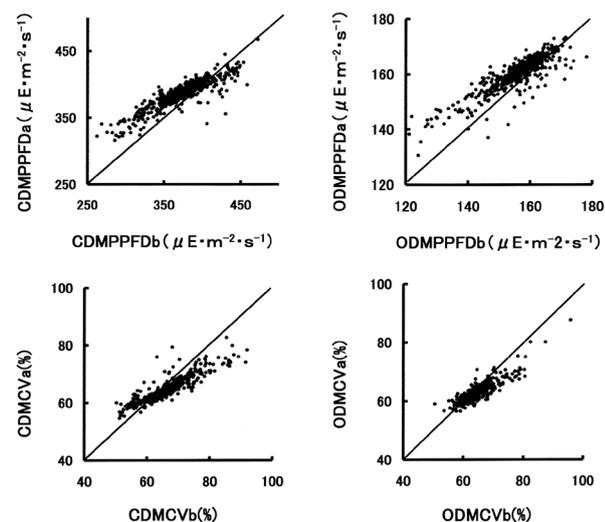


Fig. 27. Relationships between the light environmental data before the b-type of partial deformation and that after. The abbreviations refer to Table 3. The slant lines indicate 1:1 relations.

Table 15 Correlations between light environmental data of the b-type of partial deformation treatments and the proportions of values of characteristics of canopy shape after the treatment to that before. The abbreviations refer to Table 3 and Table 5. n=528.

	R1	R2	R3	R4
PSLBa / PSLBb	0.4318 ** ^z	0.3356 **	-0.3966 **	-0.1081 *
TPVda / TPVdb	-0.4727 **	-0.3469 **	0.5869 **	0.0631
LAICa / LAICb	-0.6546 **	-0.3495 **	0.5954 **	-0.1533 **
PNLESa / PNLEsb	-0.1610 **	-0.0622	0.1174 **	-0.1046 *
MCFVda / MCFVdb	-0.4790 **	-0.3150 **	0.3636 **	0.0468
MCFNSa / MCFNSb	0.1977 **	0.0212	-0.2310 **	0.2888 **
MCFEwa / MCFEWb	0.2398 **	0.1449 **	-0.2892 **	0.0594
MNLBAa / MNLBAb	-0.4604 **	-0.2471 **	0.3444 **	-0.0779
MCTVda / MCTVdb	-0.3599 **	-0.1929 **	0.4237 **	-0.1120 **
MCT3Da / MCT3Db	0.1050 *	0.1970 **	-0.0887 *	-0.2698 **
TP3Da / TP3Db	-0.6297 **	-0.4052 **	0.6308 **	-0.0161

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

3. 変形処理による光環境改善効果に関する変形処理類型間の比較

光環境関連データの処理前に対する処理後の比、つまり、CDMPPFD比、ODMPPFD比、CDMCV比およびODMCV比のそれぞれを変形処理類型ごとにグループ分けし、平均値を比較した（第19表）。この場合、このグループ分けされたデータには、変形処理の対象となった樹冠形の種類の違いおよび変形処理類型内の個々の処理方法の違いが混在したことに留意して欲しい。なお、同表の類型の縦並びはCDMPPFD比の平均値の降順とした。それから、各平均値のほか、CDMPPFD比とODMPPFD比では各比の最大値、CDMCV比とODMCV比では各比の最小値を示した（第19表）。その結果、顕著な光環境改善効果が見られた変形処理の類型として、

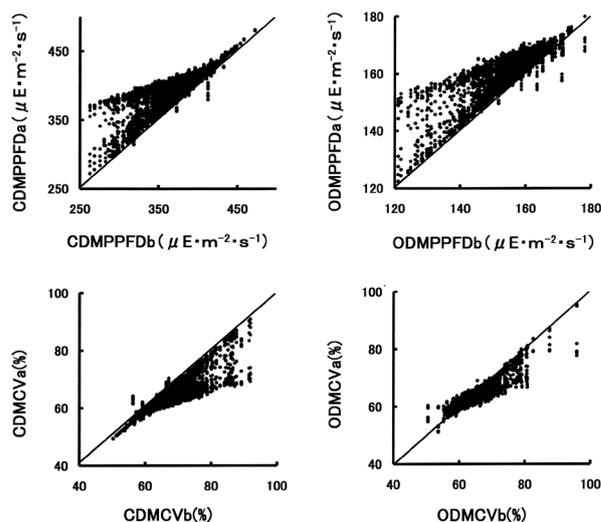


Fig. 28. Relationships between the light environmental data before the m-type of partial deformation and that after. The abbreviations refer to Table 3. The slant lines indicate 1:1 relations.

Table 16 Correlations between light environmental data of the m-type of partial deformation treatments and the proportions of values of characteristics of canopy shape after the treatment to that before. The abbreviations refer to Table 3 and Table 5. n=5280.

	R1	R2	R3	R4
PSLBa / PSLBb	0.5625 ** ^z	0.5055 **	-0.5371 **	-0.2280 **
TPVda / TPVdb	-0.0880 **	-0.0940 **	0.1693 **	0.1056 **
LAICa / LAICb	-0.7310 **	-0.5298 **	0.6428 **	-0.0077
PNLESa / PNLEsb	-0.0136	0.0173	-0.0085	-0.1101 **
MCFVda / MCFVdb	-0.6206 **	-0.4981 **	0.5270 **	0.0786 **
MCFNSa / MCFNSb	-0.5988 **	-0.5191 **	0.5565 **	0.2868 **
MCFEwa / MCFEWb	-0.5270 **	-0.5383 **	0.4848 **	0.2320 **
MNLBAa / MNLBAb	-0.6210 **	-0.4631 **	0.5203 **	0.0056
MCTVda / MCTVdb	-0.6692 **	-0.4924 **	0.6163 **	0.0111
MCT3Da / MCT3Db	-0.3998 **	-0.2146 **	0.2988 **	-0.1928 **
TP3Da / TP3Db	-0.7759 **	-0.6825 **	0.7810 **	0.2528 **

^z ** indicates significance at 1% level.

h (指定領域内葉ブロック数の減少), k (中央部における指定領域内葉ブロックの削除), m (投射光の地面漏れ防止を目的とした樹冠内葉ブロックの移動), g (葉ブロックの過疎過密併存状態の部分的解消を目的とした葉ブロックの移動) および b (樹冠表層部の葉ブロック数割合の増大を目的とした葉ブロックの移動) などが認められた (第19表). そのうえ, これら類型のCDMPPFD比とODMPPFD比の最大値は著しく大きく, CDMCV比とODMCV比の最小値は著しく小さかった (第19表). そればかりか, 第17, 18, 27, 28および29図から, 上記の極値に限らず, 最大値近辺あるいは最小値近辺の値が数多く存在したことが読み取れた. 反対に, 類型s (様々な断面形を用いて垂直状に切り取った領域内葉ブロックの削除), q (グリッド網目に沿ったスライス状あるいは

格子状の領域内葉ブロックの削除), p (底部の指定領域内葉ブロックの削除), j (等間隔に散在する単純形立体内葉ブロックの削除) などでは, 光環境改善効果は総じて小さかった (第19表).

4. 変形処理による光環境改善効果に関する処理対象となった樹冠原形の類型間比較

CDMPPFD比, ODMPPFD比, CDMCV比 および ODMCV比のそれぞれを処理対象となった樹冠原形の類型ごとにグループ分けし, 平均値を比較した (第20表). ただし, このグループ分けされたデータには, 変形処理方法の種類の違いや樹冠原形類型内の個々の樹冠形の違いが混在したことに留意して欲しい. なお, 同表の樹冠原形類型の縦並びはCDMPPFD比の平均値の降順

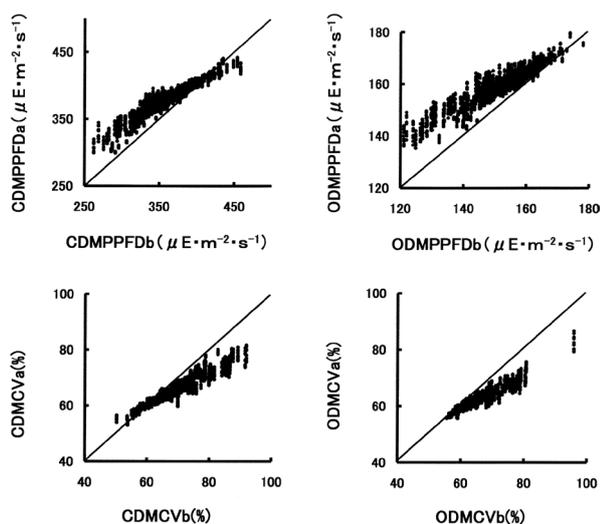


Fig. 29. Relationships between the light environmental data before the g-type of partial deformation and that after. The abbreviations refer to Table 3. The slant lines indicate 1:1 relations.

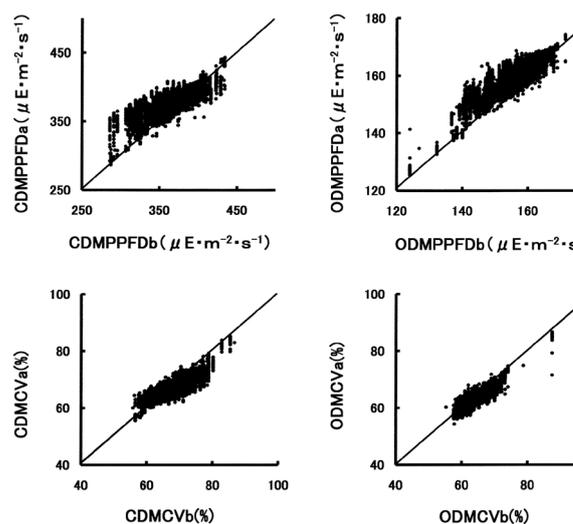


Fig. 30. Relationships between the light environmental data before the x-type of partial deformation and that after. The abbreviations refer to Table 3. The slant lines indicate 1:1 relations.

Table 17 Correlations between light environmental data of the g-type of partial deformation treatments and the proportions of values of characteristics of canopy shape after the treatment to that before. The abbreviations refer to Table 3 and Table 5. n=4561.

	R1	R2	R3	R4
PSLBa / PSLBb	0.5214 ** ^z	0.5656 **	-0.5437 **	-0.5576 **
TPVda / TPVDb	-0.2557 **	-0.1330 **	0.2885 **	-0.0421 **
LAICa / LAICb	-0.5383 **	-0.3167 **	0.4682 **	0.0741 **
PNLEsa / PNLEsb	-0.0625 **	-0.0420 **	0.0542 **	0.0307 *
MCFVda / MCFVDb	-0.5272 **	-0.4535 **	0.4634 **	0.2874 **
MCFNSa / MCFNSb	0.1134 **	0.0068	-0.1104 **	0.1992 **
MCFEwa / MCFEWb	-0.0102	-0.1570 **	0.0101	0.2967 **
MNLBAa / MNLBAb	-0.4258 **	-0.3116 **	0.3435 **	0.1112 **
MCTVda / MCTVDb	0.0364 *	0.1941 **	-0.0195	-0.2444 **
MCT3Da / MCT3Db	0.4180 **	0.5512 **	-0.4795 **	-0.5250 **
TP3Da / TP3Db	-0.4425 **	-0.3762 **	0.4402 **	0.2983 **

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

Table 18 Correlations between light environmental data of the x-type of partial deformation treatments and the proportions of values of characteristics of canopy shape after the treatment to that before. The abbreviations refer to Table 3 and Table 5. n=8332.

	R1	R2	R3	R4
PSLBa / PSLBb	0.1997 ** ^z	0.2380 **	-0.2042 **	-0.2131 **
TPVda / TPVDb	-0.0343 **	-0.0289 **	0.0637 **	0.0264 **
LAICa / LAICb	-0.6846 **	-0.4218 **	0.5995 **	-0.2214 **
PNLEsa / PNLEsb	-0.0618 **	0.0045	0.0718 **	-0.0763 **
MCFVda / MCFVDb	-0.5646 **	-0.4322 **	0.4591 **	-0.1694 **
MCFNSa / MCFNSb	0.0855 **	-0.0508 **	-0.1846 **	0.2562 **
MCFEwa / MCFEWb	0.0812 **	-0.0665 **	-0.1671 **	0.2644 **
MNLBAa / MNLBAb	-0.5643 **	-0.4247 **	0.4593 **	-0.1935 **
MCTVda / MCTVDb	-0.1068 **	0.0589 **	0.0716 **	-0.1418 **
MCT3Da / MCT3Db	-0.0451 **	0.1247 **	-0.0029	-0.2460 **
TP3Da / TP3Db	-0.4063 **	-0.3632 **	0.3484 **	0.0629 **

^z ** indicates significance at 1% level.

とした。各平均値のほかに、CDMPPFD比とODMPPFD比では各比の最大値、CDMCV比とODMCV比では各比の最小値を示した（第20表）。その結果、光環境改善効果はCDMPPFD比、ODMPPFD比、CDMCV比およびODMCV比の間で一部異なったものの、総じてL（CACOAS起源の樹冠原形）、Q（種々の単位葉層の輪状散在体）、P（樹冠中心部からの放射状散在体）、X（単位葉層の傾きと大きさが乱雑な輪状散在体）、Y（単位葉層

の傾きと大きさが乱雑ならせん状散在体）などの立体的な樹冠原形で大きかった（第20表）。反対に、J（南北組み合わせによる樹冠原形）、A（棚状連続体）、G（種々の

Table 19 The comparisons of the R1, R2, R3 and R4 between the 14 types of partial deformations. The MEANs of R1 and R2 were separated in the descending order, and the MEANs of R3 and R4 were separated in the ascending order. The types of the partial deformations were arranged in the descending order of the MEAN of R1 in the table. Abbreviations refer to Table 3.

Codes	R1		R2		R3		R4		n				
	MEAN	MAX	MEAN	MAX	MEAN	MIN	MEAN	MIN					
h	1.070	a ²	1.545	1.045	b	1.361	0.949	a	0.667	0.977	b	0.642	4560
k	1.062	b	1.510	1.049	a	1.352	0.952	a	0.692	0.970	a	0.642	2687
m	1.058	c	1.415	1.032	d	1.256	0.962	b	0.754	0.992	d	0.812	5280
g	1.045	d	1.282	1.041	c	1.223	0.965	c	0.806	0.969	a	0.819	4561
b	1.039	de	1.268	1.029	d	1.187	0.977	d	0.810	0.979	b	0.849	528
r	1.039	e	1.300	1.014	fg	1.159	0.983	e	0.819	1.008	f	0.871	2690
u	1.037	e	1.248	0.997	i	1.190	0.981	de	0.790	1.008	f	0.708	2736
x	1.026	f	1.244	1.020	e	1.140	0.987	f	0.868	0.989	c	0.770	8332
e	1.021	g	1.103	1.015	f	1.069	0.987	f	0.930	0.994	de	0.942	4560
i	1.019	g	1.121	1.015	f	1.094	0.989	f	0.888	0.992	d	0.896	3337
j	1.013	h	1.117	1.013	fg	1.070	0.994	g	0.906	0.994	de	0.938	2243
p	1.012	h	1.105	1.013	fg	1.081	0.993	g	0.901	0.992	d	0.902	2327
q	1.006	i	1.131	1.012	g	1.103	1.001	h	0.880	0.994	e	0.904	3450
s	0.999	j	1.116	1.007	h	1.104	1.007	i	0.890	0.994	e	0.880	5087

²Different letters indicates significance at 5% level by Tukey's multiple range test.

Table 20 The comparisons of the R1, R2, R3 and R4 between the 26 types of canopy shapes as prototype. The MEANs of R1 and R2 were separated in the descending order, and the MEANs of R3 and R4 were separated in the ascending order. The types of canopy shape were arranged in the descending order of the MEAN of R1 in the table. The abbreviations refer to Table 3.

Codes	R1		R2		R3		R4		n				
	MEAN	MAX	MEAN	MAX	MEAN	MIN	MEAN	MIN					
L	1.090	a ²	1.435	1.068	a	1.284	0.930	a	0.718	0.955	a	0.776	2775
Q	1.050	b	1.359	1.020	gh	1.151	0.973	cd	0.799	1.003	n	0.938	2784
F	1.042	c	1.313	1.022	fgh	1.151	0.976	def	0.817	0.995	ij	0.891	1125
P	1.042	cd	1.194	1.034	b	1.149	0.966	b	0.818	0.974	b	0.853	2809
Y	1.040	cde	1.238	1.028	c	1.120	0.971	c	0.846	0.985	ef	0.891	2809
W	1.039	cde	1.247	1.024	ef	1.152	0.974	cde	0.832	0.990	h	0.880	1563
C	1.039	cde	1.372	1.029	c	1.334	0.975	cdef	0.698	0.987	fgh	0.744	1134
T	1.037	de	1.246	1.025	de	1.158	0.974	cde	0.807	0.988	gh	0.861	2862
X	1.036	def	1.285	1.029	c	1.208	0.974	cde	0.769	0.981	cd	0.823	2755
N	1.036	def	1.134	1.022	efgh	1.098	0.979	fgh	0.892	0.999	klm	0.941	912
Z	1.036	ef	1.239	1.023	efg	1.154	0.974	cdef	0.814	0.989	gh	0.849	2817
B	1.032	fg	1.399	1.028	cd	1.352	0.977	efg	0.710	0.983	cde	0.642	2233
R	1.029	gh	1.175	1.015	jk	1.095	0.984	hij	0.886	0.999	lm	0.903	1592
V	1.028	gh	1.264	1.020	gh	1.183	0.983	hi	0.784	0.987	fg	0.851	2798
S	1.028	gh	1.184	1.018	hij	1.167	0.980	gh	0.814	0.993	i	0.828	2827
U	1.026	hi	1.242	1.023	efg	1.146	0.989	jkl	0.850	0.996	ijkl	0.871	926
M	1.024	hi	1.545	1.028	c	1.361	0.994	lm	0.667	0.981	c	0.758	2715
O	1.024	hi	1.218	1.024	ef	1.149	0.983	hi	0.830	0.983	de	0.867	2806
I	1.022	i	1.299	1.019	ghi	1.181	0.989	kl	0.803	0.987	fg	0.886	1698
H	1.022	i	1.182	1.017	ij	1.136	0.986	ijk	0.826	0.990	gh	0.854	2810
K	1.020	i	1.109	1.013	kl	1.061	0.987	ijk	0.919	0.995	ijk	0.952	1652
E	1.014	j	1.185	1.010	lm	1.070	0.997	m	0.904	0.994	ij	0.921	2317
D	1.013	j	1.089	0.997	n	1.021	0.998	m	0.950	1.008	o	0.961	470
G	1.012	j	1.120	1.008	m	1.056	0.997	m	0.930	0.997	kl	0.928	2219
A	0.996	k	1.195	1.002	n	1.079	1.020	n	0.890	1.001	mn	0.905	755
J	0.990	k	1.030	0.996	n	1.017	1.030	n	0.978	1.007	no	0.954	215

²Different letters indicates significance at 5% level by Tukey's multiple range test.

Table 21 The effects of combinations of the types of the partial deformation (rows) and the types of canopy shape as prototype (columns) on the mean value (boldfaced type) of R1s (=CDMPPFDa/CDMPPFDb) and the maximum values (thin character) in each combination. The rows were arranged in the descending order similar to Table 19 and the columns were arranged in the descending order similar to Table 20. The abbreviations refer to Table 1, 2 and 3.

	L	Q	F	P	Y	W	C	T	X	N	Z	B	R	V	S	U	M	O	I	H	K	E	D	G	A	J																									
h	1.205	1.090	1.087	1.096	1.079	1.074	1.105	1.078	1.082	1.076	1.071	1.104	1.049	1.057	1.052	1.056	1.059	1.055	1.050	1.047	1.032	1.039	1.020	1.024	1.435	1.359	1.308	1.194	1.207	1.213	1.372	1.246	1.285	1.127	1.239	1.399	1.128	1.253	1.184	1.209	1.545	1.195	1.299	1.169	1.107	1.137	1.041	1.094			
k	1.230	1.078	1.078	1.121	1.080	1.072	1.110	1.085	1.079	1.094	1.066	1.114	1.021	1.048	1.033	1.052	1.032	1.053	1.051	1.041	1.021	1.011	1.010	1.008	1.346	1.334	1.289	1.192	1.175	1.199	1.334	1.229	1.270	1.134	1.219	1.354	1.068	1.264	1.172	1.203	1.510	1.155	1.282	1.182	1.099	1.069	1.042	1.038			
m	1.135	1.095	1.088	1.066	1.065	1.069	1.054	1.061	1.062	1.055	1.067	1.054	1.061	1.056	1.051	1.052	1.061	1.043	1.042	1.044	1.033	1.050	1.044	1.037	1.023	1.135	1.325	1.313	1.156	1.238	1.247	1.278	1.218	1.218	1.120	1.213	1.321	1.175	1.196	1.141	1.242	1.415	1.218	1.256	1.149	1.109	1.185	1.089	1.120	1.195	1.030
g	1.140	1.043	1.039	1.073	1.057	1.060	1.051	1.050	1.048	1.050	1.054	1.061	1.039	1.036	1.049	1.024	1.031	1.043	1.026	1.027	1.033	1.016	1.011	1.015	1.195	1.104	1.107	1.113	1.114	1.127	1.137	1.098	1.157	1.086	1.134	1.160	1.084	1.168	1.125	1.077	1.282	1.106	1.133	1.122	1.081	1.055	1.033	1.042			
b	1.146	1.061	1.059	1.055	1.063	1.063	1.030	1.054	1.057	1.050	1.058	1.031	1.043	1.047	1.055	1.025	1.032	1.028	1.010	1.011	1.036	1.031	1.023	1.011	0.945	1.177	1.117	1.131	1.109	1.120	1.129	1.115	1.100	1.168	1.087	1.120	1.126	1.114	1.157	1.117	1.093	1.268	1.056	1.104	1.048	1.094	1.083	1.058	1.048	1.018	0.976
r	1.089	1.064	1.059	1.050	1.044	1.048	1.050	1.043	1.043	1.039	1.047	1.042	1.045	1.033	1.030	1.038	1.020	1.020	1.015	1.029	1.018	1.033	1.013	1.015	1.239	1.180	1.218	1.145	1.128	1.115	1.236	1.139	1.166	1.086	1.186	1.300	1.133	1.127	1.093	1.160	1.266	1.108	1.243	1.096	1.084	1.127	1.053	1.090			
u	1.053	1.071	1.061	1.038	1.051	1.052	1.042	1.043	1.042	1.036	1.044	1.032	1.050	1.033	1.033	1.038	1.011	1.016	1.007	1.025	1.012	1.038	1.004	1.013	1.192	1.245	1.238	1.098	1.195	1.205	1.231	1.160	1.165	1.079	1.181	1.238	1.160	1.154	1.098	1.230	1.248	1.187	1.214	1.072	1.085	1.157	1.026	1.092			
x	1.076	1.049	1.018	1.035	1.037	1.024	1.028	1.024	1.024	1.032	1.030	1.010	1.028	1.019	1.019	1.019	1.019	1.021	1.022	1.020	1.018	1.018	1.017	1.017	1.241	1.244	1.244	1.080	1.202	1.200	1.141	1.145	1.136	1.075	1.168	1.100	1.164	1.074	1.169	1.169	1.104	1.104	1.115	0.000	1.040						
e	1.034	1.021	1.024	1.021	1.021	1.021																																													

葉層断面形の輪状連続体), D (等間隔散在体) などの樹冠原形の類型で小さかった (第20表). この序列は既報 (山本, 2016) に記した光環境良否に関する樹冠原形間の序列とほぼ逆の関係にあった. つまり, 変形処理前に光環境良好だった樹冠形では変形処理により頭打ち傾向が強く現れ, 反対に, 変形処理前に光環境不良だった樹冠形では変形処理により挽回現象が強く現れた.

5. 変形処理の類型と処理対象樹冠形のタイプの組み合わせによる光環境改善効果

変形処理の類型と処理対象樹冠形のタイプの組み合わせ効果を明らかにするため, 組み合わせごとにデータをグループ分けした. 第21表では, 縦の並び (変形処理の類型) を第19表の序列になるようにし, 横の並び (樹冠原形の類型) を第20表の序列になるようにしたうえで, 縦横の組み合わせにおけるCDMPFFD比の平均値と最大値を示した. ODMPPFD比についても同様な集計表を作成した (第22表). 平均値と最大値を参考にすると, 表の左上の組み合わせほど光環境の挽回現象が強く, 表の右下の組み合わせほど光環境の頭打ち現象が強い傾向が読み取れた (第21表および第22表). 例えば, CDMPPFD比では, L (CACOAS起源の樹冠原形) とh (指定領域内葉ブロック数の減少)の組み合わせで挽回現象が強く, これとは反対に, J (南北組み合わせによる樹冠原形) と

s (様々な断面形を用いて垂直状に切り取った領域内葉ブロックの削除) の組み合わせで頭打ち傾向が強いことが示された (第21表および第22表). ただし, これらは全体の傾向であって, 詳細に見ると, 例外も見られた.

6. 変形処理類型内の個々の変形処理方法間の比較

次に類型内における個々の変形処理方法の違いを比較したい. 各類型内で, 個々の変形処理ごとにグループ分けし, CDMPPFD比, ODMPPFD比, CDMCV比およびODMCV比のそれぞれについて平均値を多重比較した (第23~35表). それから, CDMPPFD比とODMPPFD比についてはその最大値, ODMCV比とCDMCV比についてはその最小値を表中に示した. なお, 各表の縦の並びはCDMPPFD比の降順にしたことを断わっておく. また, 変形処理ごとにグループ分けしたデータには, 処理対象樹冠形の違いが混在したことにも留意されたい. とここで, 変形処理bについては処理方法が1種類であり, 6. では欠落したが, これらの数値については第19表を参照されたい.

1) 類型h

類型h (指定領域内葉ブロック数の減少) の各処理の光環境改善効果は大きかったものの, 類型内では総じて互いに似た数値となった (第23表). 樹冠上部を処理対象にしたもの (h01, h12, h13) で優れ, 樹冠の上部や

Table 22 The effects of combinations of the types of the partial deformation (rows) and the types of canopy shape as prototype (columns) on the mean value (boldfaced type) of R2s (=ODMPPFDa/ODMPPFDb) and the maximum values (thin character) in each combination. The rows were arranged in the descending order similar to Table 19 and the columns were arranged in the descending order similar to Table 20. The abbreviations refer to Table 1, 2 and 3.

	L	P	X	C	M	Y	B	T	W	O	U	Z	N	F	V	Q	I	S	H	R	K	E	G	A	D	J	
k	1.165	1.092	1.064	1.083	1.056	1.059	1.098	1.060	1.049	1.056	1.042		1.060	1.048	1.037	1.037	1.042	1.032	1.034	1.013	1.017	1.020	1.014			0.997	
	1.265	1.149	1.205	1.292	1.337	1.114	1.352	1.155	1.152	1.135	1.146		1.098	1.144	1.183	1.151	1.181	1.155	1.136	1.049	1.055	1.070	1.056			1.020	
h	1.138	1.068	1.059	1.072	1.063	1.051	1.081	1.049	1.041	1.050	1.043	1.041	1.043	1.043	1.035	1.035	1.034	1.032	1.030	1.024	1.019	1.022	1.014			0.996	
	1.284	1.144	1.208	1.334	1.361	1.120	1.347	1.158	1.142	1.149	1.109	1.154	1.083	1.151	1.182	1.151	1.181	1.167	1.135	1.073	1.054	1.063	1.047			1.012	
g	1.120	1.075	1.048	1.044	1.048	1.050	1.058	1.043	1.047	1.046	1.028		1.050	1.029	1.036	1.024	1.036	1.040	1.031	1.036	1.032	1.017	1.015			1.000	
	1.175	1.110	1.141	1.138	1.223	1.093	1.174	1.095	1.109	1.086	1.063		1.089	1.059	1.142	1.058	1.107	1.127	1.118	1.067	1.061	1.052	1.034			1.013	
m	1.084	1.045	1.039	1.038	1.038	1.037	1.038	1.035	1.033	1.030	1.044		1.032	1.039	1.031	1.035	1.028	1.027	1.024	1.024	1.018	1.020	1.015	1.012	0.991	1.005	
	1.204	1.108	1.161	1.236	1.256	1.119	1.194	1.126	1.103	1.139	1.136		1.078	1.143	1.131	1.129	1.142	1.123	1.110	1.095	1.054	1.069	1.046	1.079	1.014	1.013	
b	1.106	1.045	1.039	1.033	1.042	1.040	1.038	1.036	1.038	1.027	1.034	1.039	1.030	1.030	1.033	1.027	1.023	1.030	1.009	1.024	1.021	1.018	1.009	0.978	0.991	0.966	
	1.135	1.076	1.096	1.086	1.187	1.062	1.078	1.071	1.083	1.050	1.064	1.091	1.051	1.091	1.109	1.056	1.069	1.088	1.029	1.050	1.047	1.050	1.029	1.034	1.011	0.989	
x		1.019	1.032	1.029		1.028	1.014	1.021	1.025	1.021		1.021	1.019	1.024	1.024	1.030		1.014	1.017			1.006	1.007				
		1.046	1.084	1.119		1.107	1.140	1.077	1.081	1.113		1.116	1.056	1.098	1.095	1.115		1.069	1.077			1.061	1.027				
i	1.039	1.022	1.017	1.014	1.016	1.017	1.016	1.017	1.016	1.014	1.008		1.014	1.012	1.015	1.011	1.013	1.015	1.014	1.012	1.014	1.009	1.008			1.011	
	1.094	1.075	1.084	1.056	1.094	1.052	1.093	1.073	1.069	1.053	1.019		1.035	1.029	1.092	1.027	1.069	1.082	1.085	1.030	1.040	1.031	1.020			1.013	
e	1.021	1.017	1.015	1.016	1.016	1.014	1.018	1.014	1.014	1.015	1.013		1.014	1.014	1.014	1.014	1.015	1.014	1.014	1.014	1.013	1.013	1.013			1.012	
	1.043	1.031	1.041	1.045	1.069	1.028	1.054	1.032	1.027	1.027	1.018		1.021	1.034	1.035	1.028	1.028	1.034	1.030	1.018	1.019	1.023	1.018			1.014	
r	1.051	1.023	1.020	1.023	1.015	1.016	1.017	1.015	1.015	1.016	1.016	1.031	1.014	1.000	1.015	1.010	1.013	1.009	1.012	1.007	1.009	1.002	1.005	1.000		0.980	
	1.159	1.097	1.091	1.101	1.125	1.058	1.140	1.056	1.051	1.052	1.099	1.050	1.023	1.064	1.054	1.058	1.106	1.056	1.049	1.066	1.023	1.040	1.042			1.004	
p	1.035	1.025	1.016	1.019	1.011	1.017	1.021	1.019	1.014	1.017	1.006	1.016	1.017	1.012	1.011	1.008	1.012	1.013	1.012	1.010	1.007	1.010	1.010	1.009		1.004	
	1.070	1.055	1.050	1.069	1.068	1.057	1.050	1.073	1.040	1.059	1.027	1.077	1.041	1.062	1.033	1.023	1.053	1.069	1.081	1.018	1.037	1.037	1.027			1.016	
j	1.034	1.019	1.016	1.017	1.016	1.016	1.019	1.017	1.013	1.011	1.004	1.013	1.010	1.010	1.010	1.007	1.010	1.013	1.010	1.011	1.012	1.010	1.006			1.002	
	1.068	1.044	1.057	1.057	1.057	1.042	1.070	1.045	1.041	1.037	1.024	1.046	1.031	1.032	1.063	1.040	1.041	1.052	1.045	1.034	1.034	1.032	1.019			1.016	
q	1.039	1.026	1.017	1.017	1.010	1.017	1.021	1.017	1.015	1.014	1.010	1.014	1.014	1.006	1.010	1.007	1.017	1.015	1.010	1.009	1.013	1.001	1.006	0.997	1.002	0.994	
	1.075	1.052	1.085	1.069	1.085	1.047	1.103	1.059	1.053	1.050	1.034	1.066	1.040	1.043	1.085	1.046	1.045	1.064	1.080	1.041	1.031	1.031	1.036	1.035	1.021	1.014	
s	1.023	1.014	1.009	1.006	1.006	1.012	1.011	1.011	1.008	1.008	1.006	1.008	1.007	1.004	1.006	1.003	1.011	1.008	1.006	1.007	1.007	1.007	1.004	1.002	0.997	0.996	0.991
	1.080	1.065	1.104	1.093	1.070	1.060	1.100	1.061	1.035	1.071	1.044	1.070	1.042	1.045	1.098	1.038	1.062	1.074	1.089	1.030	1.029	1.025	1.021	1.037	1.018	1.017	
u	1.007	0.994	1.004	1.003	1.001	1.004	1.001	1.004	1.002	0.995	1.024	0.997	0.985	1.000	0.995	1.001	0.983	0.996	0.990	0.999	0.999	0.985	0.993	0.986		0.959	
	1.068	1.031	1.053	1.079	1.098	1.048	1.190	1.047	1.050	1.060	1.137	1.050	1.012	1.057	1.052	1.065	1.059	1.036	1.039	1.072	1.027	1.044	1.047			1.015	

中心部を処理対象外にしたもの(h02とh08)で劣った(第23表).

2) 類型k

類型k(割り当て空間中央部の指定領域内葉ブロックの削除)の各処理の光環境改善効果は大きかったものの、類型内では互いに似た数値となった(第24表). だが、指定領域の上部が閉じたk03で少し劣った(第24表).

3) 類型p

類型p(割り当て空間底部の指定領域内葉ブロックの削除)の各処理の光環境改善効果は小さかったうえに、類型内のいずれの方法も互いに似た数値となった(第25表).

4) 類型e

類型e(割り当て空間底部あるいは中心部から放射線状領域内葉ブロックの削除)の各処理の光環境改善効果は小さかったものの、放射線状領域の数が多いほど光環

境改善効果が優れる傾向が認められた. そして、中心部からの放射線状領域の方が底部からのものよりも優れた(第26表).

5) 類型r

類型r(割り当て空間の北側一部、下側一部あるいはこの両者内葉ブロックの削除)の光環境改善効果は、指定領域が下部のみ(r05とr06)、下部と北部(r09, r08)および北部のみ(r03, r02)の順に大きかった(第27表).

6) 類型u

類型u(割り当て空間の南側、北側あるいはこの両者を斜めに切り取ってできる領域内葉ブロックの削除)の光環境改善効果は、晴天日では指定領域が南側と北側の両者を斜めに大きく切り取ってできる領域(u05)が最も優れ、北側のみ斜めに小さく切り取ってできる領域(u04)が最も劣った(第28表). 曇天日では、これとはほぼ反対の傾向が見られたものの、各処理の光環境改善効果は小さかった(第28表).

Table 23 The comparisons of MEANs of light environmental data (R1, R2, R3 and R4) between several treatments in the h-type of partial deformation. MAXs in R1 and R2 and MINs in R2 and R4 were shown in the table. MEANs in R1 and R2 were separated in the descending order and MEANs in R3 and R4 were separated in the ascending order. The treatments were arranged in descending order of MEAN of R1 in the table. The abbreviations refer to Table 3.

	R1		R2		R3		R4		n				
	MEAN	MAX	MEAN	MAX	MEAN	MIN	MEAN	MIN					
h01	1.085	a ²	1.545	1.062	a	1.355	0.934	a	0.672	0.961	a	0.645	456
h13	1.076	ab	1.531	1.052	b	1.349	0.943	abc	0.677	0.971	b	0.642	456
h12	1.076	ab	1.542	1.053	b	1.361	0.942	ab	0.667	0.967	ab	0.767	456
h09	1.074	abc	1.264	1.045	bc	1.212	0.947	bcd	0.795	0.980	c	0.801	456
h07	1.073	abc	1.262	1.043	c	1.199	0.946	bcd	0.807	0.979	c	0.811	456
h11	1.068	bc	1.278	1.041	c	1.156	0.952	cd	0.842	0.983	c	0.815	456
h06	1.068	bc	1.262	1.040	c	1.176	0.955	d	0.842	0.987	cd	0.802	456
h10	1.068	bc	1.248	1.041	c	1.178	0.953	cd	0.832	0.983	c	0.810	456
h02	1.062	c	1.528	1.046	bc	1.351	0.953	cd	0.680	0.970	b	0.751	456
h08	1.045	d	1.151	1.027	d	1.093	0.971	e	0.910	0.992	d	0.895	456

²Different letters indicates significance at 5% level by Tukey's multiple range test.

Table 24 The comparisons of MEANs of light environmental data (R1, R2, R3 and R4) between several treatments in the k-type of partial deformation. The descriptions of the table refer to Table 23. The abbreviations refer to Table 3. n=456.

	R1		R2		R3		R4		n				
	MEAN	MAX	MEAN	MAX	MEAN	MIN	MEAN	MIN					
k07	1.078	a ²	1.409	1.052	a	1.254	0.940	a	0.749	0.940	a	0.749	456
k05	1.067	ab	1.510	1.048	a	1.352	0.948	ab	0.692	0.948	ab	0.692	456
k13	1.062	b	1.308	1.049	a	1.193	0.951	ab	0.816	0.951	ab	0.816	456
k12	1.058	bc	1.362	1.053	a	1.240	0.951	ab	0.765	0.951	ab	0.765	456
k02	1.056	bc	1.337	1.051	a	1.300	0.953	b	0.718	0.953	b	0.718	438
k03	1.047	c	1.278	1.038	b	1.254	0.969	c	0.767	0.969	c	0.767	425

²Different letters indicates significance at 5% level by Tukey's multiple range test.

Table 25 The comparisons of MEANs of light environmental data (R1, R2, R3 and R4) between several treatments in the p-type of partial deformation. The descriptions of the table refer to Table 23. The abbreviations refer to Table 3.

	R1		R2		R3		R4		n				
	MEAN	MAX	MEAN	MAX	MEAN	MIN	MEAN	MIN					
p01	1.019	a ²	1.066	1.015	ab	1.057	0.988	a	0.938	0.992	bc	0.932	455
p02	1.017	a	1.038	1.013	b	1.032	0.989	a	0.962	0.994	cd	0.959	456
p05	1.017	a	1.105	1.016	a	1.081	0.989	a	0.901	0.991	b	0.902	431
p09	1.016	a	1.097	1.017	a	1.077	0.991	a	0.905	0.993	bcd	0.926	344
p10	1.002	b	1.058	1.013	b	1.056	1.001	b	0.931	0.987	a	0.945	328
p03	0.993	c	1.045	1.006	c	1.059	1.010	c	0.930	0.994	d	0.923	313

²Different letters indicates significance at 5% level by Tukey's multiple range test.

Table 26 The comparisons of MEANs of light environmental data (R1, R2, R3 and R4) between several treatments in the e-type of partial deformation. The descriptions of the table refer to Table 23. The abbreviations refer to Table 3.

	R1		R2		R3		R4		n				
	MEAN	MAX	MEAN	MAX	MEAN	MIN	MEAN	MIN					
e10	1.025	a ²	1.103	1.017	a	1.069	0.983	a	0.930	0.992	a	0.942	456
e09	1.024	ab	1.101	1.016	ab	1.068	0.985	b	0.938	0.993	a	0.943	456
e08	1.023	bc	1.084	1.016	bc	1.052	0.985	bc	0.948	0.993	ab	0.953	456
e07	1.022	c	1.077	1.015	c	1.049	0.986	c	0.952	0.993	ab	0.962	456
e05	1.020	d	1.058	1.014	d	1.049	0.988	d	0.959	0.995	c	0.964	456
e04	1.020	de	1.059	1.014	d	1.054	0.988	d	0.963	0.995	c	0.956	456
e06	1.020	de	1.057	1.014	d	1.038	0.987	d	0.966	0.994	bc	0.970	456
e03	1.019	de	1.056	1.013	d	1.040	0.988	d	0.963	0.995	c	0.969	456
e02	1.019	de	1.052	1.013	d	1.039	0.988	d	0.970	0.995	c	0.974	456
e01	1.019	e	1.039	1.013	d	1.037	0.989	d	0.971	0.995	c	0.974	456

²Different letters indicates significance at 5% level by Tukey's multiple range test.

7) 類型q

類型q (グリッド網目に沿ったスライス状あるいは格子状の領域内葉ブロックの削除) では, 変形処理方法の違いによる影響は晴天日と曇天日で異なったものの, 互いの差は僅かであった (第29表).

8) 類型s

類型s (割り当て空間を様々な断面形を用いて垂直状に切り取った領域内葉ブロックの削除) では, 断面形が車軸状 (放射状) の場合に光環境改善の最も高い効果が見られたものの, どの処理も光環境改善効果は小さく, 互いの差も小さかった (第30表).

9) 類型j

類型j (割り当て空間に等間隔に散在する単純形立体内葉ブロックの削除) では, 等間隔に散在した立体が単純で数が多いほど光環境改善効果が高い傾向であったが (第31表), どの処理も光環境改善効果は小さく, 互いの差も小さかった (第31表).

10) 類型i

類型i (大きな葉ブロック塊の除去) では, 葉ブロック塊から葉ブロックを除去したときの条件として, 葉ブロック塊当たり葉ブロック数が6個以上の場合に除去したときの光環境改善効果が総じて優れ, 10個以上の場合に除去したときでは総じて劣った (第32表). だけど, どの処理も光環境改善効果は小さく, 互いの差も小さかった (第32表).

11) 類型m

類型m (投射光の地面漏れ防止を目的とした樹冠内葉ブロックの再配置) の光環境改善効果は, グリッド内葉ブロック柱から葉ブロックを除去した後に隣接空きブロック柱に再配置した場合 (m01~ m05) に比べ, 任意の空きブロック柱に再配置した場合 (m06~ m10) の方が総じて優れた (第33表). そのうえ, 葉ブロック柱から除去した葉ブロック数が多い処理ほど総じて優れた (第33表).

Table 27 The comparisons of MEANs of light environmental data (R1, R2, R3 and R4) between several treatments in the r-type of partial deformation. The descriptions of the table refer to Table 23. The abbreviations refer to Table 3.

	R1		R2		R3		R4		n				
	MEAN	MAX	MEAN	MAX	MEAN	MIN	MEAN	MIN					
r05	1.069	a ²	1.300	1.022	a	1.140	0.961	a	0.840	1.013	c	0.908	412
r06	1.050	b	1.239	1.021	a	1.159	0.971	b	0.819	1.003	b	0.871	455
r09	1.045	b	1.266	1.009	cd	1.126	0.991	cd	0.846	1.027	d	0.939	454
r08	1.033	c	1.215	1.011	bc	1.069	0.988	c	0.904	1.012	c	0.948	456
r03	1.022	d	1.156	1.013	b	1.099	0.989	c	0.897	0.996	a	0.934	456
r02	1.015	d	1.147	1.007	d	1.101	0.996	d	0.905	0.998	a	0.914	457

²Different letters indicates significance at 5% level by Tukey's multiple range test.

Table 28 The comparisons of MEANs of light environmental data (R1, R2, R3 and R4) between several treatments in the u-type of partial deformation. The descriptions of the table refer to Table 23. The abbreviations refer to Table 3.

	R1		R2		R3		R4		n				
	MEAN	MAX	MEAN	MAX	MEAN	MIN	MEAN	MIN					
u05	1.058	a ²	1.248	0.951	d	1.126	0.978	b	0.798	1.041	d	0.737	456
u01	1.049	b	1.214	0.999	c	1.190	0.958	a	0.790	0.992	a	0.708	456
u02	1.032	c	1.130	1.014	a	1.084	0.973	b	0.896	0.989	a	0.903	456
u03	1.029	cd	1.199	1.005	b	1.084	1.000	d	0.927	1.021	c	0.955	456
u06	1.028	cd	1.196	0.999	c	1.137	0.987	c	0.862	1.003	b	0.901	456
u04	1.024	d	1.122	1.015	a	1.106	0.990	c	0.924	0.999	b	0.939	456

²Different letters indicates significance at 5% level by Tukey's multiple range test.

Table 29 The comparisons of MEANs of light environmental data (R1, R2, R3 and R4) between several treatments in the q-type of partial deformation. The descriptions of the table refer to Table 23. The abbreviations refer to Table 3.

	R1		R2		R3		R4		n				
	MEAN	MAX	MEAN	MAX	MEAN	MIN	MEAN	MIN					
q01	1.018	a ²	1.108	1.011	b	1.078	0.997	b	0.905	1.005	d	0.929	499
q07	1.015	a	1.109	1.019	a	1.089	0.992	a	0.900	0.987	b	0.911	513
q05	1.015	a	1.131	1.007	c	1.103	1.001	b	0.880	1.009	e	0.913	445
q04	1.014	a	1.129	1.017	a	1.102	0.997	ab	0.883	0.999	c	0.918	451
q06	1.013	a	1.099	1.018	a	1.085	0.992	a	0.907	0.986	b	0.911	519
q03	0.989	b	1.063	0.997	d	1.039	1.017	c	0.945	0.999	c	0.937	511
q02	0.982	c	1.044	1.018	a	1.057	1.014	c	0.962	0.977	a	0.904	512

²Different letters indicates significance at 5% level by Tukey's multiple range test.

Table 30 The comparisons of MEANs of light environmental data (R1, R2, R3 and R4) between several treatments in the s-type of partial deformation. The descriptions of the table refer to Table 23. The abbreviations refer to Table 3.

	R1		R2		R3		R4		n				
	MEAN	MAX	MEAN	MAX	MEAN	MIN	MEAN	MIN					
s08	1.011	a ²	1.116	1.018	a	1.104	0.994	a	0.890	0.984	a	0.900	513
s09	1.010	a	1.042	1.012	b	1.038	0.997	ab	0.957	0.993	d	0.922	527
s07	1.004	a	1.048	1.010	c	1.046	1.003	c	0.956	0.995	d	0.917	523
s03	1.004	a	1.032	1.008	c	1.034	1.001	bc	0.962	0.994	d	0.924	526
s10	1.004	a	1.062	1.010	bc	1.076	1.003	cd	0.943	0.989	bc	0.908	505
s02	1.003	a	1.074	1.009	c	1.093	1.001	bc	0.909	0.992	cd	0.887	528
s04	1.001	a	1.032	1.003	d	1.026	1.008	d	0.961	1.000	e	0.924	527
s01	0.988	a	1.058	0.986	e	1.023	1.026	f	0.941	1.019	f	0.946	528
s05	0.981	a	1.066	1.008	c	1.074	1.018	e	0.920	0.983	a	0.909	431
s06	0.977	a	1.081	1.002	d	1.094	1.023	ef	0.902	0.989	b	0.880	479

²Different letters indicates significance at 5% level by Tukey's multiple range test.

12) 類型g

類型g（葉ブロックの過疎過密併存状態の部分的解消を目的とした葉ブロックの再配置）では、移動元（過密部）と移動先（過疎部）の葉ブロック数の差の一定割合を移動したが、光環境改善効果はこの割合が高い処理ほど優れた（第34表）。

Table 31 The comparisons of MEANs of light environmental data (R1, R2 R3 and R4) between several treatments in the j-type of partial deformation. The descriptions of the table refer to Table 23. The abbreviations refer to Table 3.

	R1		R2		R3		R4		n				
	MEAN	MAX	MEAN	MAX	MEAN	MIN	MEAN	MIN					
j03	1.019	a ² 1.117	1.018	a	1.070	0.989	a	0.906	0.991	a	0.938	453	
j02	1.017	a	1.070	1.012	b	1.057	0.992	b	0.947	0.997	b	0.946	442
j04	1.013	b	1.061	1.013	b	1.057	0.994	bc	0.950	0.993	a	0.949	455
j01	1.010	b	1.047	1.010	c	1.041	0.997	cd	0.944	0.996	b	0.947	445
j05	1.007	c	1.076	1.012	bc	1.057	0.999	d	0.938	0.992	a	0.938	448

²Different letters indicates significance at 5% level by Tukey's multiple range test.

Table 32 The comparisons of MEANs of light environmental data (R1, R2, R3 and R4) between several treatments in the i-type of partial deformation. The descriptions of the table refer to Table 23. The abbreviations refer to Table 3.

	R1		R2		R3		R4		n				
	MEAN	MAX	MEAN	MAX	MEAN	MIN	MEAN	MIN					
i06	1.021	a ² 1.121	1.016	ab	1.093	0.987	a	0.888	0.991	b	0.909	456	
i07	1.020	ab	1.112	1.015	b	1.094	0.987	ab	0.922	0.992	bc	0.918	456
i05	1.019	abc	1.119	1.015	ab	1.094	0.989	abc	0.904	0.992	bc	0.901	454
i08	1.019	abc	1.088	1.014	bc	1.077	0.988	ab	0.930	0.993	bcd	0.934	338
i03	1.018	abc	1.108	1.018	a	1.088	0.990	bc	0.896	0.987	a	0.896	265
i09	1.017	bc	1.046	1.013	c	1.039	0.989	abc	0.961	0.994	cd	0.958	456
i04	1.017	bc	1.107	1.015	b	1.090	0.992	c	0.901	0.991	b	0.896	456
i10	1.017	c	1.036	1.012	c	1.030	0.990	bc	0.971	0.995	d	0.966	456

²Different letters indicates significance at 5% level by Tukey's multiple range test.

Table 33 The comparisons of MEANs of light environmental data (R1, R2, R3 and R4) between several treatments in the m-type of partial deformation. The descriptions of the table refer to Table 23. The abbreviations refer to Table 3.

	R1		R2		R3		R4		n				
	MEAN	MAX	MEAN	MAX	MEAN	MIN	MEAN	MIN					
m07	1.100	a ² 1.404	1.059	a	1.256	0.925	a	0.764	0.974	a	0.822	528	
m06	1.095	a	1.415	1.056	ab	1.249	0.929	a	0.754	0.976	a	0.827	528
m08	1.092	a	1.402	1.051	b	1.244	0.935	b	0.766	0.984	b	0.812	528
m09	1.072	b	1.385	1.038	c	1.231	0.952	c	0.775	0.992	c	0.827	528
m10	1.055	c	1.352	1.029	d	1.205	0.966	d	0.806	0.995	cd	0.854	528
m01	1.049	c	1.148	1.025	d	1.098	0.968	d	0.889	0.995	c	0.910	528
m02	1.038	d	1.140	1.018	e	1.074	0.979	e	0.916	1.001	e	0.925	528
m03	1.029	de	1.132	1.014	e	1.067	0.985	f	0.935	1.002	e	0.927	528
m05	1.024	e	1.117	1.013	e	1.056	0.988	f	0.943	1.000	de	0.925	528
m04	1.024	e	1.115	1.013	e	1.057	0.988	f	0.943	1.000	de	0.926	528

²Different letters indicates significance at 5% level by Tukey's multiple range test.

13) 類型x

類型x（回転処理）の光環境改善効果は、樹冠を南側あるいは北側に傾ける回転処理（x03あるいはx04）では劣ったものの、水平回転処理では改善効果が高かった（第35表）。特にCDMPPFD比の最大値にはやや大きい数値が認められた（第35表）。けれども、各処理間の分離は悪かった。

Table 34 The comparisons of MEANs of light environmental data (R1, R2, R3 and R4) between several treatments in the g-type of partial deformation. The descriptions of the table refer to Table 23. The abbreviations refer to Table 3.

	R1		R2		R3		R4		n				
	MEAN	MAX	MEAN	MAX	MEAN	MIN	MEAN	MIN					
g01	1.049	a ² 1.282	1.047	a	1.223	0.960	a	0.806	0.964	a	0.819	457	
g02	1.048	ab	1.268	1.046	ab	1.214	0.961	ab	0.813	0.965	ab	0.822	456
g03	1.047	ab	1.264	1.045	abc	1.208	0.963	abc	0.817	0.966	abc	0.834	456
g04	1.046	abc	1.243	1.043	abcd	1.192	0.963	abc	0.832	0.967	abc	0.841	456
g05	1.045	abc	1.236	1.042	abcde	1.189	0.964	abcd	0.835	0.968	abcd	0.845	456
g06	1.045	abc	1.238	1.042	abcde	1.188	0.965	abcd	0.834	0.968	abcd	0.845	456
g07	1.043	abc	1.209	1.039	bcd	1.162	0.967	abcd	0.858	0.970	bcd	0.861	456
g08	1.042	abc	1.203	1.038	cde	1.154	0.968	bcd	0.863	0.972	cde	0.868	456
g09	1.040	bc	1.192	1.036	de	1.149	0.970	cd	0.872	0.974	de	0.879	456
g10	1.039	c	1.176	1.035	e	1.136	0.971	d	0.882	0.975	e	0.889	456

²Different letters indicates significance at 5% level by Tukey's multiple range test.

Table 35 The comparisons of MEANs of light environmental data (R1, R2, R3 and R4) between several treatments in the x-type of partial deformation. The descriptions of the table refer to Table 23. The abbreviations refer to Table 3.

	R1		R2		R3		R4		n				
	MEAN	MAX	MEAN	MAX	MEAN	MIN	MEAN	MIN					
x20	1.033	a ² 1.211	1.026	a	1.101	0.981	a	0.980	0.985	ab	0.902	348	
x30	1.033	a	1.244	1.022	abcde	1.096	0.982	a	0.978	0.987	abcd	0.929	348
x31	1.033	a	1.233	1.022	abcde	1.094	0.982	a	0.990	0.987	abcd	0.931	347
x21	1.033	a	1.225	1.026	ab	1.099	0.982	a	0.977	0.986	abc	0.897	347
x32	1.032	ab	1.234	1.021	bcdef	1.075	0.984	a	0.984	0.990	abcd	0.938	348
x33	1.032	ab	1.234	1.021	abcdef	1.085	0.983	a	0.982	0.989	abcd	0.942	347
x19	1.030	abc	1.227	1.025	abc	1.116	0.983	a	0.974	0.985	a	0.913	348
x18	1.029	abc	1.221	1.023	abcd	1.099	0.985	a	0.976	0.987	abcd	0.902	347
x22	1.029	abc	1.209	1.021	abcdef	1.113	0.986	a	0.975	0.989	abcd	0.911	347
x17	1.028	abc	1.187	1.021	abcdef	1.081	0.983	a	0.990	0.987	abc	0.941	347
x23	1.028	abc	1.216	1.020	bcdef	1.098	0.987	a	0.978	0.991	cde	0.929	347
x27	1.027	abc	1.209	1.021	abcdef	1.092	0.985	a	0.984	0.987	abcd	0.931	347
x29	1.026	abcd	1.190	1.021	abcdef	1.090	0.986	a	0.971	0.985	ab	0.921	347
x25	1.026	abcd	1.161	1.019	def	1.100	0.987	ab	0.977	0.990	abcd	0.927	347
x28	1.026	abcd	1.202	1.021	abcdef	1.092	0.986	a	0.985	0.985	a	0.925	347
x26	1.026	abcd	1.196	1.021	abcdef	1.103	0.986	a	0.984	0.986	abc	0.931	347
x24	1.026	abcd	1.164	1.019	cdef	1.119	0.989	ab	0.955	0.990	abcd	0.905	347
x14	1.026	abcd	1.162	1.018	cdef	1.100	0.989	ab	0.954	0.991	bcd	0.910	347
x15	1.025	abcd	1.175	1.018	defg	1.113	0.988	ab	0.979	0.991	bcd	0.910	347
x16	1.024	abcd	1.185	1.018	efg	1.113	0.989	ab	0.969	0.992	def	0.917	347
x06	1.020	bcde	1.197	1.013	g	1.103	0.997	bc	0.963	0.998	f	0.914	347
x05	1.019	cde	1.233	1.014	g	1.115	0.996	b	0.961	0.996	ef	0.900	347
x04	1.015	de	1.117	1.018	efg	1.082	0.996	b	0.962	0.987	abc	0.893	347
x03	1.008	e	1.137	1.016	fg	1.140	1.006	c	0.961	0.991	cde	0.770	347

²Different letters indicates significance at 5% level by Tukey's multiple range test.

考 察

1. 実験結果に関する考察

第4表および第16図から以下のことが言えよう。すなわち、処理対象樹冠形の違いや変形処理方法の違いが混在しても、葉量を変えない条件下、樹冠形の部分的変形により、相当量の光環境変化が起きうる。結果では、このときの光環境変化の特徴として、頭打ち現象と挽回現象をあげた。前者の背景として、処理前良好に保たれた受光態勢が変形処理により崩れ、結果的に改善効果がほとんど現れず、マイナス効果さえ生まれたことが考えられる。後者の背景として、処理前不良であった受光態勢が変形処理により一部改善されたものと考えられる。しかも、この挽回現象はその強弱に関わらず全ての変形処理類型に見られた（第17～30図）。このことは、前報（山本, 2016）で多種多様な樹冠形の間に見られた光環境の大きな違いと並んで重要であると考えられる。

上述の頭打ち現象と挽回現象は、部分的な変形処理により葉層分布構造に変化が生まれ、そのため光環境の変化が生じたものと考えられる。しかし、CDMPPFDなどの光環境関連データは4次元的变化量の集計値であり、そのうえ葉層分布構造は葉ブロックの3次元配列変数で表現される。したがって、後者の変化から前者の変化を直接的に解明するには、極めて複雑な思考を必要とする。

本報では、これに代わる方法の一つとして、樹冠形状値を用いた間接的解明を試みた。けれども、樹冠形状値は樹冠の形状を様々な切り口を用いて解析した数値（単値）にすぎず（山本, 2015）、さらに、樹冠形状値どうしの相関（山本, 2016）も考慮せねばならない。それゆえ、この間接的解明のねらいについては、材料および方法では省略した。そこで、結果を踏まえた段階で、少し補足説明を加えながら考察したい。

分かりやすくするために、方法の手順を再度整理しておこう。最初に、次の3種類のデータを準備した。すなわち、①変形処理前の樹冠形状値に対する変形処理後の樹冠形状値の比率、②変形処理前の光環境データに対する変形処理後の光環境データの比率、および、③上記両者（①と②）の間の相関係数であった（第5～19表）。CDMPPFDを例としてこのねらいを説明したい。ある樹冠形状値の変形処理前後の比率とCDMPPFDの変形処理前後の比率の間に正の相関が存在し、しかもその樹

冠形状値とCDMPPFDの間にも正の相関がもともと存在すれば、変形処理によりその樹冠形状値が増大したことがCDMPPFDの増大をもたらしたものと推測できる。一方、ある樹冠形状値の変形処理前後の比率とCDMPPFDの変形処理前後の比率の間に負の相関が存在し、しかもその樹冠形状値とCDMPPFDの間にも負の相関がもともと存在すれば、変形処理によりその樹冠形状値が減少したことがCDMPPFDの増大をもたらしたものと推測できる。

上記推測に必要な判断材料の一つ、光環境関連データと樹冠形状値の間の相関関係については、報告済みであったが（山本, 2016）、分かりやすくするために、これらをここで再掲しておこう。すなわち、CDMPPFDあるいはODMPPFDに対し、樹冠表面における葉層の割合（PSLB）、および3方向の樹冠厚平均値（MCT3D）は正の相関関係が存在し、3方向透過度（TP3D）、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）、上下方向葉ブロック連続数の平均値（MCFVD）、東西方向葉ブロック連続数の平均値（MCFEW）および南北方向葉ブロック連続数の平均値（MCFSN）には負の相関関係が存在した。また、CDMCVとODMCVに対し、おおよそ上記とは逆の符号の相関関係が存在した。

第5～19表の中の有意な相関関係に限れば、ほとんどの変形処理の類型において、上述の2種類の相関係数の符号は一致しており、上述の推測および間接的解明方法の妥当性を確認できたものと考えられる。

第5～19表に示した相関関係には、変形処理類型ごとの光環境改善効果の強弱や変形処理の目的の違いが反映したためか、変形処理類型によって相関の高い樹冠形状値の種類が異なった。とは言え、多くの類型に幾つかの共通点も推察できた。例えば、処理領域を機械的に指定して変形処理を行った場合でも（第5～13表）、多くの樹冠形状値の比率と光環境データの比率の間の相関は高かった。その原因として、葉ブロックの機械的除去と削除場所を避けながらの再配置により、処理前樹冠における葉ブロックの重なりが一部解消され、当たり外れはあったとしても、光環境の改善をもたらしたものと考えられる。変形処理対象の樹冠形は、その原形の形状をできるだけ多様になるべく構築したこともあり、中には葉層の過度の重なりや局部的集中のケースがあったため、機械的変形処理によりこれらが一部解消したものと考え

られる。とりわけ晴天日における光環境の顕著な改善の原因として、変形処理により樹冠占有面積当たり葉面積指数 (LAIC)、上下方向の樹冠厚平均値 (MCTVD)、上下方向葉ブロック連続数の平均値 (MCFVD) などの減少が起きたことが考えられる。晴天日では特定方向からの強い直射光が投射するため、縦方向に重なった葉層による光遮断の影響が曇天日より大きかったことが考えられる。回転処理の場合 (第18表)、曇天日における樹冠形状値の比率と ODMPPFD 比との相関が少し低かった理由として、単なる横回転だけでは曇天日における光環境に大きな変化が現れなかったことが考えられる。

様々な目的を有した変形処理の場合にも (第14~17表)、上記に似た共通点が推察できた。そして、機械的変形処理に比べ、樹冠形状値の比率との相関が高く、かつ、光環境改善効果も高かった理由として以下のことが推察された。つまり、樹冠表面葉層の割合の増大、葉塊当たりの葉ブロック数の減少、葉層の過密と過疎の併存状態の部分的解消などの目的が明確な変形処理であったため、処理効果の当たり外れが少なかったことが考えられる。

第19表の序列には、処理対象樹冠形の違いや変形処理の類型内処理方法の違いなどの大きな変動要因を含んでいたにもかかわらず、変形処理の類型間に光環境改善効果の有意差が認められたことの意義は大きいものと考えられる。ところで、類型b (樹冠表層部の葉ブロック数割合の増大を目的とした葉ブロックの再配置) においては、光環境改善の序列は高かったが (第19表)、目的としたPSLB比との相関は期待したほど高くなかった (第15表)。この理由として、PSLBと光環境関連データの相関はさほど高くはなかったうえに (山本, 2016)、葉ブロックを削除した後の再配置の都合から、PSLBがさほど増大できなかったことが考えられる。その反面、類型bの変形処理がLAICやTP3Dを大きく変えたことが影響したものと考えられる。さらに、類型i (大きな葉ブロック塊の除去) の光環境改善の序列も期待したほど高くなかった (第19表)。この理由として、削除した葉ブロックの再配置場所を無作為的に決めたことが、葉ブロック塊の除去の効果を薄めたものと考えられる。

第20表の序列は、要するに、樹冠形 (原形) の類型間における頭打ち現象や挽回現象の出やすさを示すが、類型内樹冠形の違いや変形処理方法の種類の違いなどの大きな変動要因を含んでいたにもかかわらず、有意な差

が認められたことの意義は大きいものと考えられる。ただし、第20表の序列は前報 (山本, 2016) における樹冠原形間の光環境良否の序列とはおおよそ正反対であったが、完全に正反対ではなかった。その一因として、材料および方法の2. に記したように、本報に用いた樹冠形群と前報の樹冠形群とは完全に同じではなかったことが考えられる。

変形処理の類型と処理対象樹冠 (原形) のタイプの組み合わせ効果 (第21表および第22表) を参照する際、以下の点に注意して欲しい。つまり、結果の5. で記したように、表の縦の並びと横の並びは第19表と第20表より機械的に当てはめたもので、統計学的な比較処理を施した結果ではない。全体的な傾向は、左上の組み合わせほど平均値と最大値がほぼ大きく、右下の組み合わせほどほぼ小さかったが、厳密性を欠いた。この理由として、第19表および第20表におけるグループ分けされたデータ数と第21表や第22表におけるグループ分けされたデータ数の間に大きな違いが存在したためと考えられる。

第23~35表 (同一類型における変形処理方法間の比較結果) には、比較のためのグループ分けされたデータが処理対象樹冠形の違いという大きな変動要因を含んでいたにもかかわらず、有意な差が少なからず認められたことの意義は大きいものと考えられる。しかしながら、平均値と最大値 (あるいは最小値) の差の大きさから考えてみても、組み合わせ効果に関する情報としてやや物足りず、もっと詳しく示すべきだったと思われる。とは言うものの、個々の変形処理方法と個々の処理対象樹冠形との直接的な組み合わせ総数は約5万組以上に及び、分量の関係から本報では省略したことを断っておきたい。この直接的な組み合わせごとのデータは今後の研究のための参考資料として役立つものと考えられる。そこで、各組み合わせにおける光環境関連データ、樹冠形状値、葉ブロックの3次元配列変数、積木構造図、葉量の投影図などをセットにした、公開利用できるデータベースを作成できないか検討したい。

2. 樹形の多様性と一過性、これまでにおける樹形の変形の経緯、本実験手法の意義および今後の研究課題

果樹樹冠の変形は、緒言に述べた樹形の多様性や一過性と無関係ではない。菊池・塩崎 (2005) の著書『せん定を科学する』の中で強調された“リンゴの気持を考える”こと、すなわち、せん定するときにはリンゴ樹本来の

性状を忘れてはならないことは至極当然であろう。とは言え、野生果樹の性状には栽培上不都合なものが多く含まれたと見なすのが妥当だろう。狩猟・採集の時代までの野生の果樹が、栽培果樹として各地で栽培され始めたときから今日まで、上記の性状の多くが嫌われ、矯正されてきたと見なされる。そして、現在までの整枝せん定方法の工夫や台木の利用などにより、世界各地に極めて多様な樹形 (Emerson・Hayden, 1975; 福田, 1989; 菊池, 1979a, 1979b, 1979c; Wertheim, 1978; Wertheim, 1980) が生まれたものと考えられる。

上記多様性の背景として、国や地域の気象条件 (気温、日射量、降水量、雪害、強風害)、地形、土壌、病害の多発性などの地域的差異が関係する。とりわけ気象条件 (主に光条件)、葉量、生産力などの相互関係は古くから重要な研究テーマに取り上げられている (Kappel・Flore, 1983; Jackson・Palmer, 1971; Palmerら, 1992; Heinicke, 1969)。気象と果樹の栽培分布の関係 (中川, 1984) を参考にすると、地中海沿岸、欧州の大西洋沿岸、北米太平洋沿岸などの夏乾地帯では、日射量に恵まれるものの、乾燥、少雨による葉量不足になりやすく、独自の樹形、栽植方式が形成されてきたものと考えられる。カナダや北欧などの低緯度地帯では低温による光合成作用の低下 (低生産力) が問題になり、葉量確保と光環境改善がともに課題になるものと考えられる。北米大西洋沿岸、アジア大陸太平洋沿岸などの夏湿地帯では高温多湿に加え、曇天日も多く、さらに、過繁茂による樹冠内光環境の悪化が重なることから、他の地域とは異なる独自の樹形が形成されたものと考えられる。特に、我が国のように、モンスーン地帯とも重複する地域ではこれらが顕著になると考えられる。

近年我国では、樹形の変更 (福井, 1984; 北野, 1995; 木戸, 1996; 向井, 2004; 村松, 2000; 中村, 1995; 沖嶋, 1998; 千野, 1981) が盛んに試みられている。果樹栽培にとって樹形の変更は経営上の大きな負担になるが、変更を迫られる背景も直視せねばならない。樹形の変更は経済的、社会的、政治的、食文化的な環境などの変遷により引き起こされると考えられる。とりわけ、我が国の人口減少、果樹栽培従事者の超高齢化、果樹農家の深刻な後継者不足などにより、樹形の選択に当たって、低樹高栽培のような省力化が最優先されている (荒木・藤原, 1993; 文室・村田, 1987; 村岡, 1995)。少し前の時代の9段脚立(2.7m)の使用から、6段脚立(1.8

m)、3段脚立 (0.9m)、脚立不使用へと移り変わってきた最大の理由は80歳前後の高齢者や婦人からなる果樹栽培従事者の占める割合が急増したためである。さらに、産地の移動をもたらす地球温暖化 (杉浦・横沢, 2004) やTPP問題などの栽培環境、経営環境の新たな激動が予想される。これらの状況は樹形の一過性 (流行の樹形もすぐ消えること) を強めるものと考えられる。

一方、技術の進歩も樹形の変形を加速するものと考えられる。スコアリング (目傷) 技術、誘引、捻枝などの樹形に関連した栽培技術、樹形管理用の園芸資材、果樹栽培作業用農機具などのさらなる開発は、今後一層盛んになるものと思われ、想像を超えた新技術の開発も期待される。わい性台木 (果樹試験場盛岡支場, 1987; 水谷ら, 1985)、カナムラータイプ (猪俣ら, 2004) やスパータタイプ (Arasu, 1968; 浅田, 2006) などの品種利用にとどまらず、穂木の枝幹部の諸形質、例えば、頂芽優勢性、高木性、巨木性、樹姿性 (開張性、直立性、しだれ性、叢性など)、材木生産性、分枝性、枝の伸長性などの諸形質の中の、ともすれば無用な長物と思われる部分を修正、緩和するための育種改良の取り組みを本格的に進める必要がある。

ところで、樹形 (樹冠形) の変形の意味を広くとらえたとき、これには多くのものが含まれる。品種や栽植方式が同じでも、長く続けてきた3本主枝開心形から2本主枝開心形への変更のような整枝法の大きな変更 (塩崎ら, 1988; 岸本・清家, 1972)、低樹高栽培への切り替え (荒木・藤原, 1993; 文室・村田, 1987; 村岡, 1995) および樹形改造 (倉橋, 1997; 大東ら1980) のような大規模な変更は部分的な変形とは言いがたい。部分的変形には、受光態勢の改善 (荒川ら, 1995; 倉橋・高橋, 1995; 佐藤, 2003)、作業空間の確保、農薬散布効率の改善、雪や強風に対する機械的補強などを目的とした様々な枝管理が含まれる。具体的な作業として、冬季せん定、夏季せん定 (Richard・Barden, 1982; Saure, 1987) および収穫直後のせん定 (秋季せん定)、吊り上げ、スコアリング (目傷)、誘引、捻枝などがある (福井, 1984; 北野, 1995; 木戸, 1996; 向井, 2004; 村松, 2000; 中村, 1995; 沖嶋, 1998; 千野, 1981)。最近では、栽培者の高齢化などを背景とする省力化 (農文協編, 2002, 2006, 2007a, 2007b, 2008a, 2008b, 2008c, 2009a, 2009b, 2009c, 以下、精農家技術集) や作業の安全性確保などに重点が置かれている。省力化や作業空

間確保 (Robinsonら, 1990) は緊急性が高く, また, これらを実施したときの効果も明白であるため, 盛んに取り組まれている。

上述の精農家技術集から筆者が読み取れたことは, 果実生産性の向上に不可欠な葉量確保と受光態勢の改善に対する栽培者の関心は常に高く, いずれの精農家とも, 栽培目標に必ずこれらを取り上げていたことである。また, そのための枝管理としては, 上の枝, 重なり枝, 平行枝, 逆行枝, 交差枝, 車枝, 共枝, ふところ枝などの剪除, 適度な枝間隔, 三角形の側枝 (決して逆三角形にしない) などをあげていた。これらはせん定名人と言われた人たちの経験と勘の賜物であることに違いない。ただし, 上記枝管理に関する記述内容は, 受光態勢の改善だけでなく, 樹の発育, 結実, 果実品質, 作業空間の確保, 農薬散布効率などの栽培管理上の様々な目的を有していた。そして, 受光態勢改善に絞って読めば, 内容的な物足りなさを筆者は禁じ得ない。上述の文言を標語のように羅列記載しているだけで, これらの裏付けになる変形処理の具体的記述 (部位, 変形量など) や実態調査結果 (光環境データや葉量データ) が全く見当たらなかったことである。これらの記述から筆者が感じたことは, 受光態勢の改善方法と言っても栽培者にとっては自信が無く, その効果の判断も感覚的であり, 全体として後回しにされているように感じられた。経験と勘だけでデータを欠くようでは, 科学は成立しないだろう。

上述のデータ不足の背景には, 葉量や光環境の実態調査方法が未だ確立していないことが考えられる。既報 (山本, 2014) に詳しく記したように, 樹冠内光環境の実態調査方法には問題点が多い。例えば, 最大の欠点とも言える晴天日における光環境データの欠如 (あるいは非提示) の問題, 葉面受光強度の代わりに適当に選んだ場所の水平面光強度相対値 (光合成速度推定に向かない) の計測, 晴天日曇天日とも著しい非正規分布を有する母集団からの時間的かつ空間的に限られた抽出測定, 過酷な測定作業による調査標本数の限定, 光環境に密接な要因 (例えば葉量など) が十分コントロールされないこと, 投射光条件が絶えず不安定なことによる時刻あるいは日をずらした反復実験結果の信ぴょう性などである。

本報のモデル手法には幾つかの近似性 (シミュレーション実験, パラメータ類の近似性, 葉層分布を仮想グリッドで仕切った積木構造で表現など) が存在したが, モデル手法を用いることで, 実態調査方法における上述の

問題点のほとんどを解決できたものと考えている。方法に記したように, OLEASによる1樹の光環境関連データ (CDMPPFD, ODMPPFD, CDMCVおよびODMCV) は, 'ふじ'を例にとると, 各時刻における合計10,024枚の葉面PPFDのデータの13時刻分 (合計130,312回の葉面PPFD推定値) を集計したものであった。また, 本報の実験全体として, 上記シミュレーション計算を約52,000樹以上について繰り返し, 厳格な比較条件のもとで横並びに比較したものであった。この規模の実験が可能だったのは, 言うまでも無く, モデル手法を用いたことによる。実態調査法では1樹における光データ計測数はせいぜい数百回程度が限界であると考えられる。

果樹の光合成を積極的に高める栽培管理方法が極めて乏しい (Barden・Ferree, 1979; Ferree, 1978; Gergely・Erdélyi, 1985) だけに, 前報 (山本, 2016) および本報における光環境改善効果が光合成の改善にどれだけ役立つかについては大変興味深い。これに関連した研究報告例は皆無に近いが, ウメの花芽分化期から落葉期にかけて, 葉の受光量が40~50%に減少したとき, 葉の光合成能は2分の1から6分の1に低下することが報告されている (宮原, 1995)。しかし, この理由の詳細については示されていない。筆者は, この理由として, 光合成作用の光飽和曲線性格 (石井・長井, 1978; 山本ら, 1995; 山本ら, 1993), すなわち, 弱光域においてみかけの光合成速度が急変するためであろうと考える。本報におけるCDMPPFDやODMPPFDの増大現象 (挽回現象) は, 変形処理前の弱光域部分 (日陰部分) の受光量増大によるものが大きいと考えられる。何故ならば, 天空からの投射光は処理に関わらず不変であるため, 変形処理前に強光域であった部分 (日向部分) の受光量は変形処理後もさほど変わらないと見なされる。よって, 上述のみかけの光合成速度が急変する領域での受光量増大は光合成改善に大いに役立つものと期待される。ただし, これらはあくまで推測である。よって, 既報 (山本, 2014) のシミュレーション実験で用いたように, 毎時刻, 全葉の葉面PPFD値の算出とともに各葉のみかけの光合成速度を同時に推定計算し, 1日としての光合成量を変形処理前後で比較する必要があるものと考えられる。

今後, 上記の光合成に及ぼす影響, 樹形 (整枝法や枝の配置) の多様性と果樹園光環境の関係, 上述のデータベース化, 現行の光環境・葉量実態調査法に代わる次世代技術の開発などの研究に取り組みたい。

摘 要

果樹園光環境改善要因の解明のために、モデル手法を用いて以下の実験を行った。前報（山本，2016）で扱った樹冠原形の29類型に及ぶ多種多様な樹冠形を対象に、葉量を変えない条件で、かつ、樹冠形を大きく変えない範囲で樹冠形を部分的に変形する処理（以下、変形処理）を施し、果樹園光環境を比較した。変形処理のうち、機械的変形処理には、指定領域の葉ブロック数の減少と再配置（類型h）、中心部の葉ブロックの削除と再配置（類型k）、底部の葉ブロックの削除と再配置（類型p）、底部あるいは中心部から放射状に形成される領域の葉ブロックの削除と再配置（類型e）、北側一部、下側一部あるいはこの両者における葉ブロックの削除と再配置（類型r）、南側、北側あるいはこの両者を斜めに切り取る領域の葉ブロックの削除と再配置（類型u）、割り当て空間のグリッド網目に沿ったスライス状領域あるいは格子状領域の葉ブロックの削除と再配置（類型q）、様々な断面形を用いて垂直状に切り取った領域の葉ブロックの削除と再配置（類型s）、等間隔散在立体内にある葉ブロックの削除と再配置（類型j）および樹冠形まるごと水平回転あるいは南側や北側に僅かに傾ける縦回転（類型x）の合計10類型を設けた。樹冠形状の診断を行いながら様々な目的をもった変形処理には、大きな葉ブロック塊の中の葉ブロックの除去と再配置（類型i）、樹冠表層部の葉ブロック割合を高めるための葉ブロックの移動（類型b）、投射光の地面漏れ防止するための葉ブロックの移動（類型m）および葉ブロックの過疎過密併存状態を部分的に解消するための密集領域から過疎領域への葉ブロックの移動（類型g）の合計4類型を設けた。各類型内には数種類の処理方法を含み、変形処理方法は全体として118種類であった。変形処理方法と処理対象樹冠形を組み合わせたところ、組み合わせ実現数は合計52,378個であった。OLEAS（山本，1999）を用いたシミュレーション実験の結果、全体として、処理前光環境が良好な場合には光環境の頭打ち現象および処理前光環境が不良な場合には光環境の挽回現象が明瞭に認められた。ただし、変形処理の類型によっては、頭打ち現象と挽回現象に強弱が見られた。光環境関連データ（樹平均値）の処理前数値に対する処理後数値の比率を算出し、これら比率の類型平均値を比較したところ、晴天日平均葉面PPFDの場合、 $h > k > m > g \geq b \approx r \approx u > x > e$

$\approx i > j \approx p > q > s$ の大小関係が認められ、曇天日平均葉面PPFDの場合、 $k > h > g > m \approx b > x > i \approx e \geq r \approx p \approx j \approx q > s > u$ の大小関係が認められた。また、光環境改善に密接な樹冠形状値も変形処理によって変化し、相関分析の結果から判断して、上記改善に寄与したものと考えられた。各類型内の個々の変形処理間にも光環境改善効果の大小関係が一部認められ、また、変形処理によっては著しい改善効果も認められた。

引用文献

- 荒川 修・塩崎雄之輔・菊池卓郎. 1995. マルバカイドウ台木リング‘ふじ’弘大方式半密植主幹形樹の樹冠内光条件と果実分布. 園学雑. 63 (4) : 711-718.
- 荒木 斉・藤原俊一. 1993. クリの低樹高整枝・せん定と樹冠間隔が園地の生産構造並びに収量と果実重に及ぼす影響. 近畿中国農研. 96 : 13-24.
- Arasu, N. T. 1968. Spur-type sports in apple. Rpt. E. Malling Res. Sta. 1967: 113-119.
- 浅田武典. 1989. リンゴ園における葉面積の推定法. 園学雑. 58 : 25-29.
- 浅田武典. 2006. リンゴ樹における発生部位別スパー構成に関する研究. 弘前大学農学部生命科学部学術報告 第9号 : 28-67.
- 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.
- Emerson, F. H. and R. A. Hayden. 1975. High density "tree walls". Fortsciencs. 10(6): 550.
- Ferree, D. C. 1978. Cultural factors influencing net photosynthesis of apple trees. HortScience 13: 650-652.
- 福井正夫. 1984. II. 整枝法, 加除式農業技術体系果樹編. キウイ. p. 基51-基58. 農文協. 東京.
- 福田博之. 1989. リンゴわい化栽培におけるスピンドル樹形の歴史. 農業および園芸. 64 (10) : 58-66.
- 文室政彦・村田隆一. 1987. 低樹高密植カキ園の整枝法(第2報) 整枝法による葉量と光透過及び枝梢の成長の差異. 滋賀農試研報. 28 : 78-84.
- Gergely, I. and G. Erdélyi. 1985. Relationship between water supply and assimilation in apple trees. Acta

- Agronomica Academiae Scientiarum Hungaricae. 34: 47-54.
- Heinicke, D. R. 1969. The micro-climate of fruit trees. II. Foliage and light distribution patterns in apple trees. Proc. Amer. Soc. Hort. Sci. 83: 1-11.
- 猪俣雄司・工藤和典・和田雅人・増田哲男・別所英男・鈴木邦彦. 2004. カラムナータイプ‘メイポール’の樹体生育・果実生産効率・乾物生産特性に及ぼす整枝法の影響. 園学研. 3: 387-392.
- 石井現相・長井晃四郎. 1978. リンゴ葉の光合成能に関する研究（第2報）単葉および新梢の光合成特性について. 園芸学会昭和53年度秋季大会発表要旨: 28-29.
- Jackson, J. E. and J. W. Palmer. 1971. Interception of light by model hedgerow orchards in relation to latitudes, time of year and hedgerow configuration and orientation. J. Appl. Ecol. 2: 341-357.
- 果樹試験場盛岡支場編. 1987. 昭和62年度果樹課題別研究会. わい性台リンゴの樹形管理法検討資料.
- Kappel, F. and J. A. Flore. 1983. Characterization of the light microclimate in four peach hedgerow canopies. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 108(1): 102-105.
- 木戸啓二. 1996. II. 仕立て方と整枝・せん定. 加除式農業技術体系果樹編3. 西洋ナシ. p. 技45-技51の5. 農文協. 東京.
- 菊池卓郎. 1979a. 西欧のリンゴ密植栽培 [1]. 農業および園芸. 54 (1): 41-43
- 菊池卓郎. 1979b. 西欧のリンゴ密植栽培 [2]. 農業および園芸. 54 (2): 307-310
- 菊池卓郎. 1979c. 西欧のリンゴ密植栽培 [3]. 農業および園芸. 54 (3): 408-414
- 菊池卓郎・塩崎雄之輔. 2005. せん定を科学する 樹形と枝づくりの原理と実際. 農文協. 東京.
- 岸本 修・清家金嗣. 1972. 日本ナシの整枝法の変更に伴う果実生産要因の推移. 園学雑. 41 (4): 331-338.
- 北野励信. 1995. II. 仕立て方の種類と方法. 加除式農業技術体系果樹編6. ウメ. p. 技63-技68. 農文協. 東京.
- 倉橋孝夫. 1997. リンゴのY字形棚整枝における物質生産と栽培法に関する研究. 島根県農業試験場研究報告. 31: 1-59.
- 倉橋孝夫・高橋国昭. 1995. Y字形棚整枝と主幹形整枝 リンゴ樹‘ふじ’の光環境と果実品質および光合成特性の比較. 園学雑. 65 (3): 499-508.
- 水谷房雄・山田昌彦・谷口俊哉・小泉京子・杉浦 明・苫名 孝. 1985. ニワウメ及びユスラウメ台がモモ‘大久保’のわい化に及ぼす効果. 園学雑. 54 (3): 327-335.
- 向井武男. 2004. II. 各整枝法の特徴. 加除式農業技術体系果樹編3. ナシ. p. 技181-技190. 農文協. 東京.
- 宮原継男. 1995. 結実を左右する条件. 加除式農業技術体系果樹編6. ウメ. p. 技7-技11. 農文協. 東京.
- 村松久雄. 2000. II. 仕立て方の種類と特性. 加除式農業技術体系果樹編4. ビワ. p. 技74-技78. 農文協. 東京.
- 村岡那三. 1995. IV. 樹高の切り下げ. 加除式農業技術体系果樹編6. ウメ. p. 技74の2-技74の7. 農文協. 東京.
- 中川行夫. 1984. 気象と災害. 佐藤公一・森 英夫・松井 修・北島 博・千葉 勉編著. 果樹園芸学大辞典. p. 186-206. 養賢堂. 東京.
- 中村 一. 1995. II. 樹形構成と仕立て方. 加除式農業技術体系果樹編6. モモ. p. 技117-技124. 農文協. 東京.
- 農文協編. 2002. 精農家のクリ栽培技術. 加除式農業技術体系果樹編5. クリ. p. 秋田・門脇1-熊本・山本9. 農文協. 東京.
- 農文協編. 2006. 精農家のオウトウ栽培技術. 加除式農業技術体系果樹編4. オウトウ. p. 北海道・佐藤1-鹿児島・富永8. 農文協. 東京.
- 農文協編. 2007a. 精農家のイチジク栽培技術. 加除式農業技術体系果樹編5. イチジク. p. 千葉・岡田1-福岡・末永6. 農文協. 東京.
- 農文協編. 2007b. 精農家のビワ栽培技術. 加除式農業技術体系果樹編4. ビワ. p. 千葉・穂積1-沖縄・島田6. 農文協. 東京.
- 農文協編. 2008a. 精農家のモモ栽培技術. 加除式農業技術体系果樹編6. モモ. p. 山形・山口1-愛知・林10. 農文協. 東京.
- 農文協編. 2008b. 精農家のウメ栽培技術. 加除式農業技術体系果樹編6. ウメ. p. 宮城・我妻1-福島・松本11. 農文協. 東京.

- 農文協編. 2008c. 精農家のリンゴ栽培技術. 加除式農業技術体系果樹編1. リンゴ. p. 北海道・松田1-岐阜・空野9. 農文協. 東京.
- 農文協編. 2009a. 精農家のカキ栽培技術. 加除式農業技術体系果樹編4. カキ p. 山形・三浦1-熊本・坂本10. 農文協. 東京.
- 農文協編. 2009b. 精農家のブドウ栽培技術. 加除式農業技術体系果樹編2. ブドウ. p. 北海道・佐藤1-鹿児島・富永8. 農文協. 東京.
- 農文協編. 2009c. 精農家のナシ栽培技術. 加除式農業技術体系果樹編3. ナシ. p. 福島・円谷1-佐賀・高田12. 農文協. 東京.
- 沖嶋秀史. 1998. 樹形のタイプと仕立て方. 加除式農業技術体系果樹編4. カキ. p. 技105-技111. 農文協. 東京.
- 大東 宏・小野祐幸・富永茂人・森永邦久・工藤和典. 1980. ウンシュウミカンの栽植方式と樹形に関する研究(第1報)異なる樹形における着果部位別日射量, 気温, 果実温の日変化と1日の積算日射量. 園学雑. 49 (3) : 331-346.
- Palmer, J. W., D. J. Avery and S. J. Wertheim. 1992. Effect of apple tree spacing and summer pruning on leaf distribution and light interception. *Scientia Horticulturae*. 52(4): 303-312.
- Richard, P. M. and J. A. Barden. 1982. Light penetration on overcast and clear days, and specific leaf weight in apple trees as affected by summer or dormant pruning. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 107: 39-43.
- Robinson, T. L, W. F. Miller, J. A. Thorpe, S. G. Carpenter and A. N. Lakso. 1990. Mechanical harvestability of Y-shaped and pyramid-shaped 'Empire' and 'Delicious' apple trees. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 115 (3): 368-374.
- 佐藤孝宣. 2003. 仕立て方とせん定の実際. 加除式農業技術体系果樹編4. オウトウ. p. 技65-技68. 農文協. 東京.
- Saure, M. C. 1987. Summer pruning effects in apple—a review. *Scientia Horticulturae*. 30 : 253-282.
- 千野知長. 1981. II. わが国ブドウ栽培技術の歴史. 加除式農業技術体系果樹編2. ブドウ. p. 基5-基19. 農文協. 東京
- 塩崎雄之助・菊池卓郎・今 満・藤井明彦・三上道彦. 1988. マルバカイドウ台リンゴ半密植栽培の技術確立に関する研究. 弘前大学農学部学術報告. 49 : 22-33.
- 杉浦俊彦・横沢正幸. 2004. 年平均気温の変動から推定したリンゴおよびウンシュウミカンの栽培環境に対する地球温暖化の影響. 園学雑. 73 (1) : 72-78.
- Wertheim, S. J. 1978. Pruning of slender spindle type trees. *Acta Horticulturae* 65: 173-180.
- Wertheim, S. J. 1980. High-density planting: development and current achievements in the Netherlands, Belgium, and West Germany. *Acta Horticulturae* 114: 318-327.
- 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 (2) : 155-166.
- 山本隆儀. 1999. 果樹園光環境解析システム(OLEAS). 山形大学紀要(農学) 13 (3) : 89-116.
- 山本隆儀. 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一. 山形大学紀要(農学) 17 (2) : 67-99.
- 山本隆儀. 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一. 山形大学紀要(農学) 17 (3) : 227-259.

