

## 果樹園光環境解析システム (OLEAS)

山本隆儀

山形大学農学部生物生産学科農業生産学講座  
(平成10年9月1日受理)

### Orchard Light Environment Analyzing System (OLEAS)

Takanori YAMAMOTO

Section of Agricultural Production, Department of Bioproduction,  
Faculty of Agriculture, Yamagata University, Tsuruoka, 997-8555, Japan  
(Received September 1, 1998)

#### Summary

Crossings of beams of oblique-square pillar (BOSPs) against internal cubic blocks in a virtual grid (VG) gave a possibility to analyze in accordance with Monsi and Saeki's theory (1953) light environment in an isolated fruit tree crown where leaves did not distribute at random to the horizontal directions. Some partial corrections of the model's parameters and improvements of the work of simulation were made on the previous model (Yamamoto, 1988). The tests of the modified model (SCLEAS) produced good results. By extending the functions of the SCLEAS from a single fruit tree to an orchard, a new system (OLEAS) was developed. The use of the OLEAS was limited to orchards where fruit tree crowns having an identical shape and canopy structure were arranged with an arbitrary planting distance. The distance between the predicted fruit tree and the neighbor trees, namely, tree space and row space, should be integral-fold of length of a side of the block in the VG. By the procedure, in the spaces of outside of the predicted VG the OLEAS can utilize repeatedly a set of data from the crossings, namely,  $V_r$  values (ratios of the volume of a solid cut by both a BOSP and xyz co-ordinates to the volume of a block) and these block positions, which are calculated once in the predicted VG. When the altitude of parallel beam ( $H_o$ ) is greater than  $45^\circ$ , the range of surrounding fruit trees which have actions of light extinction on the predicted tree is limited to the 8 neighbor trees against all azimuths of the beams ( $A_z$ ), and the 3 neighbor trees against an  $A_z$ . When  $H_o$  is smaller than  $45^\circ$ , a vertical plane of entrance of BOSPs is set at the distance which is integral-fold of  $G$  in the horizontal direction from the side of the predicted VG and also is longer than the shortest distance where any light extinction by the surrounding trees does not occur. By the procedure a set of data of the  $V_r$ s and the block positions can be used repeatedly every time a top of BOSP moves the distance of  $G$ . Algorithms to judge whether a top of BOSP stepping down along  $z$  axis exists within the predicted tree or a surrounding tree or the other space are devised in the 2 cases ( $H_o \geq 45^\circ$  and  $H_o < 45^\circ$ ) using several simultaneous inequalities. If a top of BOSP exists within a surrounding tree, the OLEAS make a parallel translation of the grid covering the tree to overlap completely to that of the predicted tree. The cumulative leaf area index from the entrance of BOSP to the top ( $L'$ ) is calculated using leaf number per block of the top. This leaf number per block is given by reference to the value of array of distribution of leaf number ( $B(\underline{x}, \underline{y}, \underline{z})$ ) of the corresponding position in the predicted VG after the translation. Because the OLEAS has the same principle as the SCLEAS, the OLEAS is thought to have the same effectiveness as the SCLEAS. The work tests of the OLEAS produced good results against many orchard models which were constructed by arranging the several fruit tree crown models with 8 planting systems.

**Key words** : light environment, analyzing system by a computer, orchard, canopy structure, planting system

## 緒 言

門司・佐伯（1953）は生産構造図が物語る作用と反作用の数学モデルを光吸収に関する Beer-Lambert 式の一般形で表現した。すなわち、群落上と群落内の水平面光強度の比 ( $I/I_0$ ) が、散乱光（曇天）下の測定結果に基づく吸光係数 ( $k$ ) と積算葉面積指数 (cumulative leaf area index,  $L_c$ ) を用いて(1)式で計算できることを示した。そして、(1)式の微分方程式から積算葉面積指数 ( $L_c$ ) が単位量増えることに伴う減光量（すなわち葉の受光量） $I'$ を(2)式で与えた。ここで、 $m$ は葉の光透過率である。

$$I/I_0 = \exp(-kL_c) \quad (1)$$

$$I' = kI_0 \exp(-kL_c) / (1-m) \quad (2)$$

さらに、葉の受光量と真の光合成速度との間の関係（直角双曲線）に(2)式を結びつけ、群落の剰余生産速度や最適葉面積指数などを理論化した。この成果は最適  $k$  値の解析 (Kuroiwa, 1978; Verhagen ら, 1963), 理想葉群構造（葉傾角の理想的鉛直分布）の研究 (Verhagen ら, 1963; 黒岩・門司, 1963b; Duncan ら, 1967) へと引き継がれ、わが国などの水稻の多収穫技術に貢献した。しかし、晴天下では、直射光の強さ、その入射角、さらに直射光と散乱光の量的比率も日変化し、晴天下の光環境や葉群光合成は複雑に変化する。黒岩・門司 (1962a) は直射光の吸光係数  $K_d$  と葉の傾斜角度  $\alpha$  との関係をはじめ解析したが、その後電子計算機が利用できるようになると同種の解析が進んだ (de Wit, 1965; Ross・Nilson, 1966; Duncan ら, 1967; Isobe, 1969)。さらに全体としての葉の傾斜角度分布の形を知ることにより  $K_d$  の数値積分が可能になった (Horie・Udagawa, 1971)。また、群落内の二次散乱光の解析（上向きと下向き各成分の計算）などが行われた (Horie, 1981)。

上記の門司・佐伯理論およびその延長上の理論に共通した積算葉面積指数 ( $L_c$ ) は群落の鉛直方向に計測したものであった。葉量分布が水平方向に均一であるとする連続分布型群落では、群落最上部からの深さが同じであれば、いずれの場所をとっても同じ  $L_c$  値を有するので、光環境や光合成速度は同じになる。しかし、これが水平方向にも不均一になる離散分布型植被の群落では、その深さが同じでも場所により  $L_c$  は異なり、門司・佐伯理

論およびこの延長上の理論をそのまま用いることはできない。

連続分布型群落でも水平方向の葉量分布は厳密には均一ではない。さらに、果樹、桑樹、茶樹、庭園木、林木、その他の大型作物などの個体（植被）内およびその群落（果樹園、桑園、茶園、庭園、森林、広畝作物畑など）には、水平方向の葉量分布の不均一性が明瞭に認められる。これらの作物群落（離散分布型群落）には、門司・佐伯理論がそのままでは適用しがたいことから、植被の外形を単純化し、その外形を用いて光遮断率などを幾何学的に計算した研究報告が多い。これらの研究手法は植被内部の葉面受光強度の分布を解析しないので、植被内の光環境の改善や群落光合成量の増大に結びつく研究が展開できない。なお、上記の離散分布型植被の光環境解析の研究史については既報 (山本, 1988) を参照されたい。

門司・佐伯理論 (1953) によらない方法の一つとして、近年、疑似乱数を利用したコンピュータシミュレーションが試みられた (田中, 1969; 伊藤, 1984; Geller・Nobel, 1984, 1986; Oikawa・Saeki, 1977; Oikawa, 1977a, b)。最近、伊藤 (1995) が作成した推定システム、MORUS-LICS は、計測データに基づいて、桑樹の幹、枝および葉の多様な空間配置を与える機能をもつとともに、幹や枝の曲面や葉の平面と様々な光線（直線）との交わりを数多く計算する。太陽光（直線）と個々の葉面との間の交わりの回数は日向部面積に比例し、あらゆる方向からの光線と葉面との交わりの回数は日陰部受光強度に比例する。MORUS-LICS はこの原理を用いて計算した全ての葉のデータを集計することにより、受光状態と群落光合成速度を評価するもので、門司・佐伯理論 (1953) と本質的に異なるが、実測値との間に良好な結果を得ている。離散分布型植被の主力作物である果樹（筆者の専門分野）は長年にわたる整枝剪定の履歴のため、枝の走行と分岐、樹冠の外形および葉の分布構造などに極めて大きな多様性をもつ。また、樹冠が大きいうえに小型で平板状の、多数の（通常、樹当たり数千枚から数万枚の）葉を持つため、その光環境の測定あるいは推定には多くの困難を伴った。桑園で用いた伊藤 (1995) の手法は、果樹園内の膨大な数の枝葉の面座標の与え方などの点で解決すべき課題を残すが、果樹園光環境の解析を進めるための一つであると考えられる。

一方、筆者は果樹（独立樹）の光環境解析の研究を行う中で、従来のものとは全く異なる方法、すなわち、立

キーワード：光環境、コンピュータによる解析システム、果樹園、葉群構造、栽植様式

立方体グリッドと斜方柱状平行光線とを交錯することにより、門司・佐伯理論に基づいて扱うこと（つまり、吸光係数と積算葉面積指数の使用）が可能であると考え、果樹の葉面放射の樹冠内分布シミュレーションモデルを作成し、セイヨウナシやカキを用いて、その検証実験を行った（山本，1988）．以後、このモデルに一部数式を含む修正や改良を施したものを独立樹冠光環境解析システム（Single Crown Light Environment Analyzing System、略して SCLEAS）と記す．さらに、SCLEAS を任意の栽植様式をもつ平地上の果樹園にも適用できるように工夫し、果樹園光環境解析システム（Orchard Light Environment Analyzing System、以後、略して OLEAS と記す）を作成した．SCLEAS の中味は既報（山本，1988）に記載したものとほとんど同じであるが、SCLEAS から OLEAS への拡張方法の説明に当り、SCLEAS の構造に関する知識が不可欠である．そこで、本報は既報（山本，1988）の正誤表、その後の改良点および表現方法の改善も含め、集大成した SCLEAS の要点を記すとともに、SCLEAS と OLEAS の接点、OLEAS の構造および単純な樹冠モデルから成る果樹園モデルに対する OLEAS を用いた解析結果を報告する．

## 材料および方法

### 1. 立方体グリッドと斜方柱状平行光線を組み合わせた独立樹冠内光環境解析システム (SCLEAS) における解析方法の要点

#### 1) 投射光の取扱

葉量が水平方向に均一に分布すれば投射光の方位角度は無視できる．門司・佐伯（1953）は方向を特定できない天空からの一次散乱光を扱った．晴天を対象とした黒岩・門司（1963a）や Horie・Udagawa（1971）は葉面受光強度の計算のときを除き、太陽の方位角度を扱わなかった．葉量が水平方向にも不均一に分布するとき、投射光の方向（仰角と方位角度）は光強度減衰の解析において重要な要素になる．SCLEAS は方向を特定しない散乱光の使用を避けて、傾斜角度（光線の仰角、 $H_o$ ）と方位角度（南中から東回りにはかった角度、 $A_z$ ）の両者を必ずもつ光線、すなわち、平行光線を用いた．太陽の  $A_z$ （太陽の方位角度）およびその  $H_o$ （太陽高度）は、それぞれ、(3)式および(4)式で与えた．

$$A_z = 15(12 - O_c) - 0.25M_n \quad (3)$$

$$\sin H_o = \sin \psi \sin \delta + \cos \delta \cos \psi \cos A_z \quad (4)$$

ここで  $O_c$  および  $M_n$  は、それぞれ、推定時刻（標準

時）に相当する地方時の時刻および分であり、 $\psi$  および  $\delta$  は、それぞれ、推定地の緯度および推定日の赤緯であった．

天空からの投射光（天空一次散乱光）は方向の異なる無数の平行光線の重複投射と考えた．つまり、太陽光線と同じ平行直進性（空間のどこを取っても近似的に同じ平行光線を投射するという性格）を有し、その光の強さが極めて弱い、架空の太陽を天空に散りばめたものと考えた（第一の仮定）．天空の方位角度を均等に  $J_e$  個、地平線から天頂までの角度を均等に  $K_e$  個に分けてできる  $J_e \times K_e$  個の天空小区画の各中心に、上記の架空の太陽を配置し、 $J$  番目と  $K$  番目の組み合わせでできる天空小区画の中心の仰角 ( $H_{oJK}$ )、その方位角度 ( $A_{zJK}$ ) および架空の太陽からの光の水平面強度  $I_{sJK}$  を、それぞれ、(5)、(6)および(7)式で与えた．

$$H_{oJK} = 45 / J_e + 90 (J - 1) / J_e \quad (5)$$

$$A_{zJK} = 180 / K_e + 360 (K - 1) / K_e \quad (6)$$

$$I_{sJK} = I_s \Omega_{JK} \sin H_{oJK} / \left( \sum_{j=1}^{J_e} \sum_{k=1}^{K_e} \Omega_{JK} \sin H_{oJK} \right) \quad (7)$$

ここで  $I_s$  は天空一次散乱光の水平面強度、 $\Omega_{JK}$  は天空小区画の立体角であった ((8)式)．

$$\Omega_{JK} = 2\pi / K_e \{ \cos \{ \pi / (2J_e) (J_e - J) \} - \cos \{ \pi / (2J_e) (J_e - J + 1) \} \} \quad (8)$$

### 2) 葉量の空間分布の表現方法

本報では、1 辺の長さが可変の立方体グリッドを仮想グリッドと記す．仮想グリッドの3軸を  $n$  分割したときに内部にできる立方体のブロック（以後、ブロックと略記する）に0もしくは任意の葉数（整数）を配置した（第1図）．すなわち、仮想グリッドの直交する3座標軸のそれぞれを、ブロック1辺の長さで区切るごとに、0 から  $n-1$  までの区間番号（それぞれ、 $x$ 、 $y$  および  $z$ 、整数）を割り振り、これらを要素とする3次元配列変数  $B(x, y, z)$  に葉数データを格納した．これにより、積木構造とはいえ、ブロックの大きさの精度で、全く任意の外形と葉量の不均一な空間分布をもつ樹冠モデルをつくることのできる（第1図）．さらに、ブロックの大きさは必要に応じて変えられる．なお、 $x$  軸は東西方向、 $y$  軸は南北方向および  $z$  軸は鉛直方向とした（第1図）． $B(x, y, z)$  を1次元配列変数  $b(i)$  に表現しなおすには(9)式を用いる．

$$B(x, y, z) = b(i) = b(n_x^2 + n_z + x + 1) \quad (9)$$

配列変数  $B(x, y, z)$  に格納する葉量データの入手方法には、①グリッドを用いた実測、②写真計測を用いた樹形・葉群構造解析システム（山本・山口，1989；山

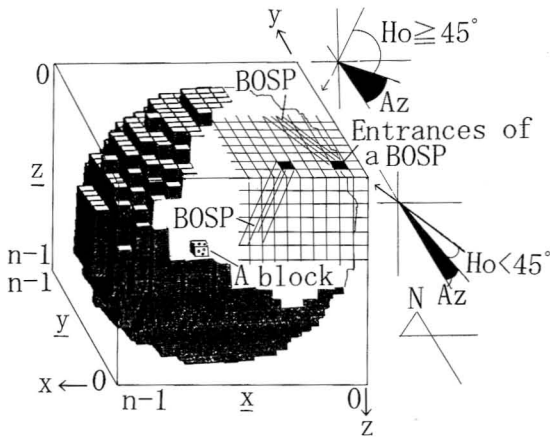


Fig. 1. A fruit tree crown model can be constructed by arranging a leaf number or nothing (0) into each internal block of a virtual grid (VG). Combinations of blocks with leaves can make the crown to have various internal canopy structure and external form though an appearance of bricks. The positive direction of  $x$ ,  $y$  and  $z$  axis of the VG indicates west, north and the earth, respectively. A closed square on the upper surface of the VG indicates an entrance of a beam of oblique-square pillar (BOSP) which has an altitude ( $H_o$ ) and an azimuth ( $A_z$ ).

本・島, 1991; 山本・伊藤, 1996) による推計, および, ③樹形・葉群構造構築プログラムによる発生 (山本, 1998) がある。

### 3) 仮想グリッドと斜方柱状平行光線の交錯

仮想グリッド最上段 (およびその延長上) のブロックの一つから,  $H_o$  および  $A_z$  を有する平行光線を入射させて, 1本の斜方柱状平行光線 (beam of oblique-square pillar) をつくる (第1図)。以後, この光線を略して斜方柱光 (BOSP) と記し, その形状を斜方柱 (OSP) と記す。

仮想グリッドと斜方柱光が交錯すると, 様々な形の立体ができる。塞 (さい) の目状に切った寒天ゼリーに, さらに斜方柱状の切れ込みを入れてからばらばらにすることを想定していただきたい。この斜方柱内の積算葉面積指数を計算するためには (1.の4) を参照, このばらばらになった立体の体積を計算する必要がある。これらの立体の形はグリッドの  $xy$  平面で切断されてできる水平面,  $yz$  平面および  $zx$  平面で切断されてできる垂直面, および,  $H_o$  と  $A_z$  でさまる斜面で囲まれた5~10面体である。以後, これを多面体と記す。それぞれの多面体

の体積は, 全ての頂点の空間座標を代数的に求め, 幾何学的に体積を計算するのが最も正確であるが, SCLEAS は以下の近似的な方法を用いた。  $H_o \geq 45^\circ$  の場合, 斜方柱光が仮想グリッド最上段の隅のブロック (入射口) からブロック1段だけ下方に伸びたとき (第2図), 入射口 (ABCD) から先端の正方形 (A'B'C'D') までを,  $z$  軸に沿って  $xy$  平面に平行に  $h$  分割する。このときできる  $h$  個の各正方形の4隅の頂点の  $xy$  座標とこの4点が属するブロックの位置 ( $\underline{x}$ ,  $\underline{y}$  および  $\underline{z}$ ) を計算する。1個の正方形は  $x$  および  $y$  の区分線 (第2図の破線で示すブロック境界線) により4個の矩形に分割されるが, これらの矩形の面積は4頂点の  $xy$  座標から計算できる。  $h$  を十分大きくとり,  $h$  分割したときの厚さ ( $H$ ) と矩形の面積の積を同一のブロックに属する矩形に限り合計すれば, 切りとられた多面体1個分の体積の近似値になる。斜方柱光がブロック1段だけ下方に伸びる間 (1個の平行6面体ができる間) に, 同じ段の連なった

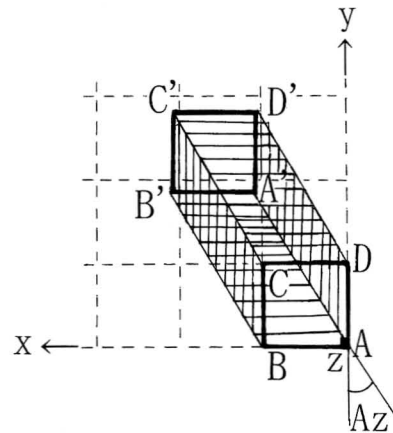


Fig. 2. Calculation of volume ( $V$ ) of a solid cut by both a VG and an oblique-square pillar (OSP). When an OSP moves a distance of the length of a side of the block along  $z$  axis from a square (ABCD) on the grid surface and arrives at another square (A'B'C'D'), the  $V$  is calculated by the next equation.

$$V = \sum_{i=1}^h A_i H$$

Here,  $A_i$  and  $H$  denotes an area of a  $i$ -th rectangle belongs to a same block (in broken lines) and thickness ( $z$  axis) of  $h$ -division, respectively. A subroutine program calculates a ratio of a solid volume to the block one ( $V_r$ ) and the position of the block ( $\underline{x}$ ,  $\underline{y}$  and  $\underline{z}$ ) to which the solid belongs.

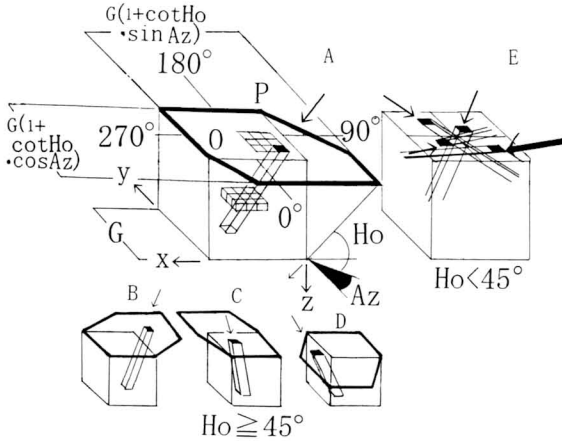


Fig. 3. Four areas of entrance of BOSP on the upper surface of VG of xyz co-ordinates (areas enclosed by bold lines) corresponded to 4 ranges of Az (A:  $0 \leq Az < 90^\circ$ , B:  $90^\circ \leq Az < 180^\circ$ , C:  $180^\circ \leq Az < 270^\circ$  and D:  $270^\circ \leq Az < 360^\circ$ ) in the case of  $Ho \geq 45^\circ$ , and the case of  $Ho < 45^\circ$  (E).

9個のブロックのうち最大8個を切り取る（最大8個の多面体ができる）ことがある（第2図）。同じ段に生じる全ての多面体の体積を計算するためには、正方形の4頂点のxy座標を絶えず監視し、これらが別のブロックに移るときは別の多面体の体積計算を始めるようにすればよい。第2図において、斜方柱光が正方形（A'B'C'D'）から出発して、さらに一つ下の段に進む場合についても、上記同様な計算を行い、これを最下段まで繰り返した。

仮想グリッド最上段の隅のブロックから入射し、最下段までに達する1本の斜方柱について、ブロック体積に対するそれぞれの多面体の体積の割合（ $V_r < 1$ ）およびこの多面体が属するブロックの位置（ $\underline{x}$ ,  $\underline{y}$  および  $\underline{z}$ 。以後、ブロック位置と略す）を計算し、記憶した。上記の隅のブロックとは別のところにあるブロックから入射する斜方柱光に、この記憶された計算結果を利用するためには、同一の段の9個の連なったブロック位置とその $V_r$ 値を、これらの連なり方の順序を固定して計算し、かつ、その順序で記憶するサブルーチンプログラムが必要である。ただし、この方式では9個の $V_r$ 値の幾つかは0の値をもつ。さらに、斜方柱光のAzの範囲によっては、入射口は仮想グリッド最上段の別の3つの隅のブロックをとることになる。たとえば、 $0^\circ \leq Az < 90^\circ$ の場合は隅の入射ブロックの位置は（0, 0, 0）であるが、 $90^\circ \leq Az < 180^\circ$ の場合のそれは（0, n-1, 0）である。また、ブロックの連なり方の順序も異なる。したがって、

ブロック位置とその連なり方の順序を、Azの4つの範囲に分けて別々に設定した4個のサブルーチンプログラムを作成した。

同じ方向をもつ斜方柱光が、仮想グリッドの中にある全てのブロックを通過するために必要な仮想グリッド最上段（およびその延長上）における入射領域は次のようになる。すなわち、第3図のAに示すように、 $G(1 + \cot Ho \sin Az)$ と $G(1 + \cot Ho \cos Az)$ の長さの2辺でできる長方形が、グリッドの4隅のうちの2点（第3図Aの点Oおよび点P）を通る方位角度がAzの2本の平行線に挟まれてできる平行6辺形である。ここで、Gは仮想グリッド1辺の長さである。

$Ho \geq 45^\circ$ の場合、グリッド最上段の4隅のブロックの1つから入射する1本の斜方柱光について、上記の $V_r$ 値群とブロック位置群を計算し、記憶したとする。たとえば、分割数が21の仮想グリッドであれば、 $189 (= 21 \times 9)$ 個の $V_r$ 値および189組のブロック位置（ $\underline{x}$ ,  $\underline{y}$  および  $\underline{z}$ ）を一定の順序で記憶したとする。これと同じ傾き（ $Ho$ と $Az$ ）をもつ斜方柱光がこの入射領域内の別のブロックの一つから入り、最下段に到達するまでの189組のブロック位置は、上記の隅の入射口のブロック位置と任意の入射口のブロック位置との間の相対的關係（ずれ）を用いて修正計算でき、 $V_r$ 値群はそのまま使用できる。すなわち、上記サブルーチンプログラムによる計算を行う必要がない。なお、このサブルーチンプログラムの計算アルゴリズムの詳細は既報（山本, 1988）を参照されたい。

$Ho < 45^\circ$ の場合（第1図および第3図E）、 $Ho$ が小さいと、斜方柱光がグリッドの1段分下方に伸びるごとに極めて多くの数の多面体を生じるうえに、仮想グリッド底部まで到達しない（その側面から外に出てしまう）。このため、 $Ho \geq 45^\circ$ の場合と同じサブルーチンプログラムを使用できない。そこで、 $Ho \geq 45^\circ$ の場合と同じ格好になるように仮想グリッドを回転した。そして、この回転の結果生じた新座標系におけるブロック位置と光線の角度を上記のサブルーチンプログラムの計算に用いた（以後、変換後のものを $\underline{x}'$ ,  $\underline{y}'$ ,  $\underline{z}'$ ,  $Ho'$  および  $Az'$  と記す）。たとえば  $0 \leq Az < 45^\circ$  の場合（第4図Aの上）、仮想グリッドの側面であるxz面に入射領域面をとり、この面が上面になるように仮想グリッドを回転してできる新座標系（ $\underline{x}'\underline{y}'\underline{z}'$ 座標系、第4図Aの下）を考えると、第5図に示した計算方法により、 $Ho' = \sin^{-1}(\cos Az \cos Ho)$ ,  $Az' = \tan^{-1}(\tan Ho \csc Az)$ ,  $\underline{x}' = \underline{z}$ ,  $\underline{y}' = \underline{x}$  および

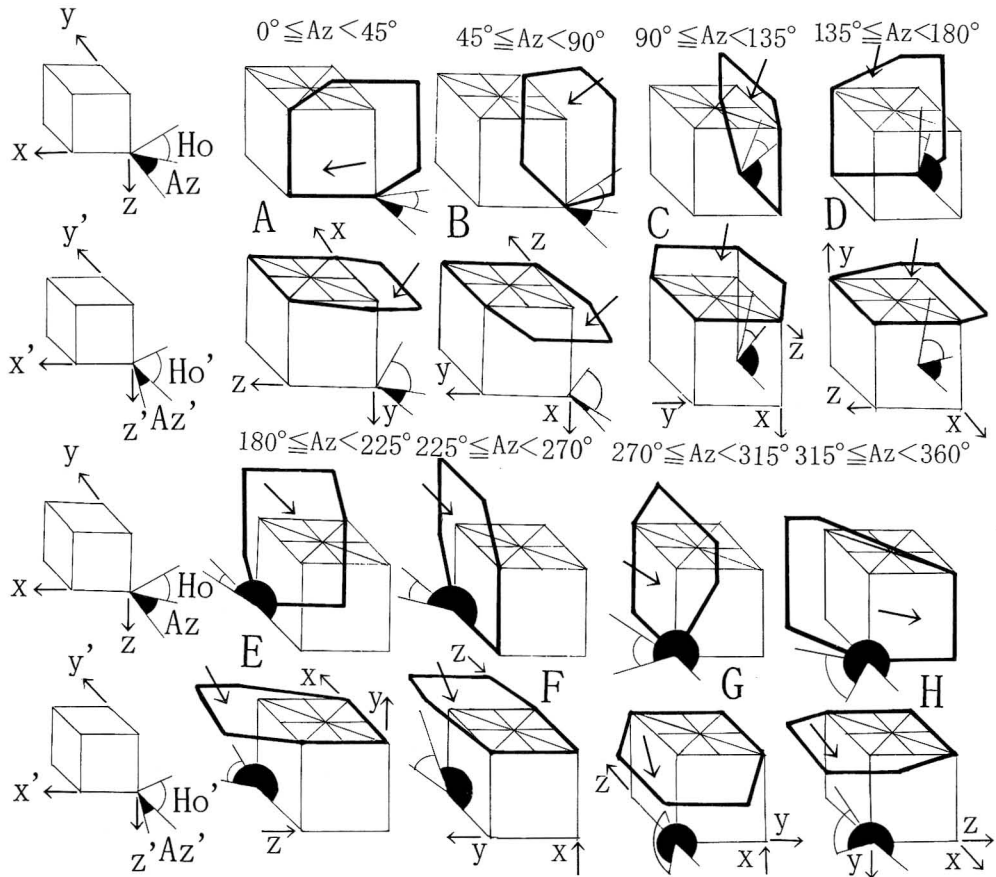


Fig. 4. An area of entrance of BOSP on a side surface of VG of  $xyz$  co-ordinates (an area enclosed by a bold line at upper part of each range of  $Az$ ) and that on the upper surface of VG of  $x'y'z'$  co-ordinates converted by Table 1 (an area enclosed by a bold lines at the lower part of each range of  $Az$ ) in the case of  $Ho < 45^\circ$ . Original  $xyz$  co-ordinates are shown in each VG of  $x'y'z'$  co-ordinates (each lower part). When converted  $Ho'$  values (open angles) and  $Az'$  values (closed angles) are used as the beam directions in VG of  $x'y'z'$  co-ordinates, the same relationships as the case of  $Ho \geq 45^\circ$  (Fig. 3) appeared between the areas and the beam directions. Therefore, the same subroutine program is utilized for calculation of  $V_r$  values and block positions as the case of  $Ho \geq 45^\circ$ .

$z' = y$  になった。ただし、 $Az$  の範囲により、仮想グリッドの回転方法が異なる。 $Az$  の 8 領域における変換後の値を第 1 表に示した。なお、この表は既報 (山本, 1988) の正誤表を再掲載したものである。SCLEAS はこの変換を終えると、 $Ho \geq 45^\circ$  の場合と同じ要領で、新座標系の仮想グリッドの最上段 (およびその延長上) に  $Ho'$  と  $Az'$  をもつ斜方柱光の入射領域を設定し (第 4 図の A~H の下)、 $Ho \geq 45^\circ$  のときと同じサブルーチンプログラムを用いて  $V_r$  値群とブロック位置群を一度計算するとともに、その後の計算を行う。ただし、この場合、計算

されるブロック位置は新座標系表現になるから、ブロック内葉数である  $B(x, y, z)$  値を参照するときには、その都度、第 1 表により、ブロック位置 ( $x', y'$  および  $z'$ ) を旧座標系グリッドにおけるブロック位置 ( $x, y$  および  $z$ ) に変換せねばならない。

注意すべきことは、 $Ho < 45^\circ$  の  $Ho$  と  $Az$  を組み合わせて第 1 表で計算される  $Ho'$  の約 16% が  $45^\circ$  以上にならないので、あらかじめ第 1 表を用いて試算し、これを避けた組み合わせを選ぶことである。例えば、8 方位 ( $Az$ ) と 6 仰角 ( $Ho$ ) を組み合わせて生じる 48 個の天空区画か

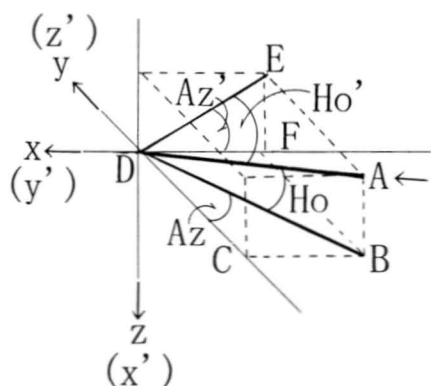


Fig. 5. An example of calculation of  $Ho'$  and  $Az'$  in a case of  $Ho < 45^\circ$  and  $0 \leq Az < 45^\circ$  (upper part of Fig. 4-A). As  $Ho'$  is an altitude against  $x'y'$  plane,

$$\sin Ho' = \frac{AE}{AD} = \frac{CD}{AD} \cdot \frac{CD}{AD} = \frac{AD \times \cos Ho \cos Az}{AD}$$

$$\therefore Ho' = \sin^{-1}(\cos Az \cos Ho)$$

As  $Az'$  is an azimuth against  $y'$  axis,

$$\tan Az' = \frac{EF}{DF} = \frac{AB}{CB} \cdot \frac{CB}{DF} = \frac{AD \times \cos Ho \sin Az}{AD \times \sin Ho}$$

$$\frac{AB}{AD} = \sin Ho$$

$$\therefore Az' = \tan^{-1}(\tan Ho \cos Az)$$

らの平行光線を用意する際、南中から  $45^\circ$  間隔の 8 方位を取る代わりに、 $25^\circ$  ずつ東にずらした 8 方位とする。また、太陽方位 ( $Az$ ) と太陽高度 ( $Ho$ ) についても月日と時刻を選ぶ ((3) および (4) 式を参照)。この点については既報 (山本, 1988) の公表後に判明したものであり、SCLEAS 使用上の主な改良点である。

#### 4) 斜方柱内積算葉面積指数 ( $L'$ ) の計算方法

3) に記したように、1 本の斜方柱光について段ごと 9 個の多面体の  $Vr$  値 (0 値も含む) とブロック位置 ( $x$ ,

$y$  および  $z$ ) が計算できた。ブロック内の葉の分布がランダムと見なすと (第二の仮定)、ブロック内葉数である  $B(x, y, z)$ ,  $Vr$  値および個葉平均面積 ( $a$ ) の 3 者の積を段ごと 9 組ずつ計算し、これらの積を入射口ブロックから任意の段 ( $s'$ ) まで積算し、斜方柱の底面積 ( $\omega$ ) で割れば、そこまでの積算葉面積指数 ( $L'$ ) になる (10式)。

$$L' = \sum_{s=1}^{s'} \sum_{q=1}^9 a Vr_{sq} B_{sq} / \omega \quad (10)$$

ここで、 $B_{sq}$  は 1 本の斜方柱が仮想グリッドの  $s$  段目を切り取ってできる平行 6 面体を構成する幾つかの多面体のうち、 $q$  番目の多面体が所属するブロックのもつ葉数であり、 $Vr_{sq}$  はその多面体の  $Vr$  値である。

ブロック 1 辺の長さを  $Bl$  とすれば、 $Ho \geq 45^\circ$  のときは斜方柱の底面積 ( $\omega$ ) は  $Bl^2$  に等しい。 $Ho < 45^\circ$  のときの斜方柱内積算葉面積指数 ( $L'$ ) は、新座標系の仮想グリッドの各段 (旧座標系の仮想グリッドとして見れば各列) までの積算葉面積を、この斜方柱が旧座標系仮想グリッドの  $xy$  平面を切り取ってできる面積 ( $\omega$ ) で割ったものになる。この  $\omega$  の計算式については既報 (山本, 1988) には記載しなかったのでここに記した ((11)~(18)式)。

$$0^\circ \leq Az < 45^\circ \quad \omega = Bl^2 \cot Ho \cos Az \quad (11)$$

$$45^\circ \leq Az < 90^\circ \quad \omega = Bl^2 \cot Ho \cos (90^\circ - Az) \quad (12)$$

$$90^\circ \leq Az < 135^\circ \quad \omega = Bl^2 \cot Ho \cos (Az - 90^\circ) \quad (13)$$

$$135^\circ \leq Az < 180^\circ \quad \omega = Bl^2 \cot Ho \cos (180^\circ - Az) \quad (14)$$

$$180^\circ \leq Az < 225^\circ \quad \omega = Bl^2 \cot Ho \cos (Az - 180^\circ) \quad (15)$$

$$225^\circ \leq Az < 270^\circ \quad \omega = Bl^2 \cot Ho \cos (270^\circ - Az) \quad (16)$$

$$270^\circ \leq Az < 315^\circ \quad \omega = Bl^2 \cot Ho \cos (Az - 270^\circ) \quad (17)$$

$$315^\circ \leq Az < 360^\circ \quad \omega = Bl^2 \cot Ho \cos (360^\circ - Az) \quad (18)$$

Table 1. Conversions from the  $xyz$  co-ordinates of block positions ( $x$ ,  $y$  and  $z$ ) and direction angles of BOSP ( $Ho'$  and  $Az'$ ) in the 8 species of  $x'y'z'$  co-ordinates corresponding to 8 ranges of  $Az$  when  $Ho$  is smaller than  $45^\circ$ .

Ranges of $Az$	$x'$	$y'$	$z'$	$Ho'$	$Az'$
$0^\circ \leq Az < 45^\circ$	$z$	$x$	$y$	$\sin^{-1}(\cos Az \cos Ho)$	$\tan^{-1}(\tan Ho \operatorname{cosec} Az)$
$45^\circ \leq Az < 90^\circ$	$y$	$z$	$x$	$\sin^{-1}(\sin Az \cos Ho)$	$\tan^{-1}(\cot Ho \cos Az)$
$90^\circ \leq Az < 135^\circ$	$n-1-y$	$n-1-z$	$x$	$\sin^{-1} \cos(Az-90^\circ)\cos Ho $	$90^\circ + \tan^{-1} \tan Ho \sec(180^\circ - Az) $
$135^\circ \leq Az < 180^\circ$	$z$	$n-1-x$	$n-1-y$	$\sin^{-1} \sin(Az-90^\circ)\cos Ho $	$180^\circ - \tan^{-1} \tan Ho \sec(Az-90^\circ) $
$180^\circ \leq Az < 225^\circ$	$n-1-z$	$x$	$n-1-y$	$\sin^{-1} \sin(270^\circ - Az)\cos Ho $	$180^\circ + \tan^{-1} \tan Ho \sec(270^\circ - Az) $
$225^\circ \leq Az < 270^\circ$	$y$	$n-1-z$	$n-1-x$	$\sin^{-1} \cos(270^\circ - Az)\cos Ho $	$270^\circ - \tan^{-1} \tan Ho \operatorname{cosec}(270^\circ - Az) $
$270^\circ \leq Az < 315^\circ$	$n-1-y$	$z$	$n-1-x$	$\sin^{-1} \sin(360^\circ - Az)\cos Ho $	$360^\circ - \tan^{-1} \cot Ho \cos(360^\circ - Az) $
$315^\circ \leq Az < 360^\circ$	$n-1-z$	$n-1-x$	$y$	$\sin^{-1} \cos(360^\circ - Az)\cos Ho $	$360^\circ - \tan^{-1} \tan Ho \operatorname{cosec}(360^\circ - Az) $

### 5) 吸光係数の計算方法

門司・佐伯理論およびその延長上の理論が扱う吸光係数（減衰係数あるいは消散係数ともいう）に準じて、SCLEAS 内では2種類の吸光係数を用いた（山本, 1988）。一つは仰角  $H_0$  なる平行光線（太陽光線あるいは天空小区画からの平行光線の両者をさす）のうち、枝葉に遮られずに直接到達する量が斜方柱内に存在する葉群や枝群によって減少する割合を特徴づけるもので、直射光吸光係数  $K_{dH_0}$  と名づけた（山本, 1988）。もう一つは仰角  $H_0$  なる平行光線が斜方柱内の葉肉組織を透過するときおよび葉面に対して下向きに反射するとき、その水平面光強度が減少する割合を特徴づけるもので、二次散乱光吸光係数  $K_s$  と名づけた（山本, 1988）。二次散乱光に変じた後の光線の方向を入射前の方向と同じものにするには、単一方向をもつ光線を扱う SCLEAS の解析手法に起因するが、同時に本解析方法の誤差源の一つである。

#### a) 直射光吸光係数

直射光吸光係数は、光を遮る物体のもつ何らかの量に対する水平面へのこの物体の陰の面積の比である。門司・佐伯の理論式（(1)式）においては、この何らかの量が葉面積ということになる。様々な方角と傾斜角度をもつ物体群の直射光吸光係数の計算は複雑である。

葉群の直射光吸光係数  $K_{dH_0}$  は Horie・Udagawa (1971) の方法により計算した。すなわち、果樹品種の葉群の平均傾斜角度 ( $\bar{\alpha}$ ) とその分散 ( $\sigma^2$ ) を計測し、葉の傾斜角度分布をベータ関数を用いて近似した。ベータ関数のパラメータの  $\lambda$  と  $\nu$  を計算し（(19)および(20)式）、次にベータ関数値を得た（(21)式）。

$$\lambda = (\bar{\alpha} - 2\alpha^2 / \pi - 2\sigma^2 / \pi) \bar{\alpha} / \sigma^2 \quad (19)$$

$$\nu = (\bar{\alpha} - 2\alpha^2 / \pi - 2\sigma^2 / \pi) (1 - 2\bar{\alpha} / \pi) \pi / (2\sigma^2) \quad (20)$$

$$B(\lambda, \nu) = \int_0^{\pi/2} (2\alpha / \pi)^{\lambda-1} (1 - 2\alpha / \pi)^{\nu-1} d\alpha \quad (21)$$

葉の方位角度分布が全方位均一であると見なされ、かつ、葉の傾斜角度の確率密度分布関数  $\bar{\Psi}(\alpha)$  が(22)式で表現される葉群に対して、仰角  $H_0$  の平行光線が入射したときの直射光吸光係数  $K_{dH_0}$  は(23)式で与えられる（Horie・Udagawa, 1971）。

$$\bar{\Psi}(\alpha) = (2\alpha / \pi)^{\lambda-1} (1 - 2\alpha / \pi)^{\nu-1} / B(\lambda, \nu) \quad (22)$$

$$K_{dH_0} = \int_0^{\alpha^*} \bar{\Psi}(\alpha) \cos \alpha d\alpha + \int_{\alpha^*}^{\pi/2} 2\bar{\Psi}(\alpha) / \pi (\cos \alpha + \sin^{-1} u + \sin \alpha \cot H_0 \sqrt{1 - u^2}) d\alpha \quad (23)$$

ここで、 $\alpha^* = H_0$ ,  $u = \cot \alpha \tan H_0$  であった。

葉群中には枝が混じる。枝は円柱状もしくは円錐台状

の物体である。門司・佐伯理論は枝については触れていない（(1)式参照）。Yim ら（1969）は葉群の直射光吸光係数  $K_{dH_0}$  と枝群の直射光吸光係数  $K_{dsH_0}$  とを用いて、枝葉群の直射光吸光係数を合成した。この場合、枝葉群という物体の「何らかの量」として、その葉面積だけをとりあげ、これに対する、水平面への葉群と枝群の両者の陰の面積の比をもって枝葉群の直射光吸光係数とするものであった（Yim ら, 1969）。これにならって、SCLEAS は、後に記すように、あらかじめ、枝群の直射光吸光係数 ( $K_{dsH_0}$ ) を枝の縦断面面積に対する水平面上におけるその陰の面積の比として求めておき、枝葉群の直射光吸光係数を(24)式により合成計算した（山本, 1988）。

$$K_{dH_0} = K_{dH_0} + A K_{dsH_0} \quad (24)$$

ここで  $A$  は葉の総面積に対する枝の総縦断面面積の割合であった（山本, 1988；山本ら, 1990）。様々な方角や傾斜角度をもつ枝群に対する仰角  $H_0$  の平行光線の直射光吸光係数  $K_{dsH_0}$  の求め方は以下の方法によった。まず、傾斜角度を6階級に分け、各階級の枝の縦断面面積の割合  $R_j$  ( $j=1\sim 6$ ) を品種ごと調査した。さらに、円柱模型実験（山本ら, 1990）により、一定の傾斜角度 ( $\gamma$ ) をもち、全方角を向く円柱群に対する仰角  $H_0$  の平行光線の直射光吸光係数  $K_{dcH_0, \gamma}$  を、平面における陰の形を写し取る方法で全ての  $\gamma$  について測定し、次にこの重回帰式（(25)式）を得た。SCLEAS は、この重回帰式の説明変数の一つ、円柱の傾斜角度 ( $\gamma$ ) に、上記の6階級に分けた枝の傾斜角度の各階級中央値 ( $\gamma_j$ ) を当て、SCLEAS 内の変数である  $H_0$  とともに、6個の円柱群直射光吸光係数  $K_{dcH_0, \gamma_j}$  を重回帰推定した。そして、この6個の値にそれぞれの  $R_j$  の重みをつけて平均し（(26)式）、 $K_{dsH_0}$  を発生させた。

$$K_{dcH_0, \gamma} = 0.1467\gamma - 7.806\sin\gamma + 5.507\cos\gamma + 0.325\tan H_0 + 0.354\sin\gamma \cot H_0 - 0.000000594\tan\gamma - 4.641 \quad (25)$$

$$K_{dsH_0} = \sum_{j=1}^6 R_j K_{dcH_0, \gamma_j} \quad (26)$$

要するに、平板状の葉と異なり、枝の直射光吸光係数は数的には求め難いことから、円柱模型による経験式、用いた果樹品種の枝の傾斜角度分布のデータおよび平行光線の  $H_0$  を用いて、近似的に計算したものであった。そして、この  $K_{dsH_0}$  と(23)式で計算した  $K_{dH_0}$  とを用いて  $K_{dH_0}$  を計算した（(24)式）。

#### b) 下向き二次散乱光の吸光係数

下向き二次散乱光の吸光係数  $K_s$  は、品種に特有な葉



の光学的形質 (反射率や透過率) とともに, 平行光線の仰角 ( $H_o$ ), 葉の傾きおよび光路内の積算葉面積指数 ( $L'$ ) の影響を受けると考えた. 人工光源からの平行光線中に枝葉を配置した特殊な装置 (山本ら, 1990) により, 異なる  $L'$  および  $H_o$  を多数組み合わせながら, 装置内の光路の水平面強度を測定した. この水平面強度から直射光成分を除く計算処理を施すことにより, 葉を透過した光と下向き反射した光の両者を合計した水平面強度 ( $I'$ ) を得た. 積算葉面積指数が  $L'$  の葉層を, 任意の仰角  $H_o$  の平行光線が通過する際の二次散乱光の吸光係数  $K_{S_{H_o, L'}}$  の値は, 入射前の平行光線水平面強度 ( $I_o$ ),  $I'$  および  $L'$  を用いて(27)式により計算した.

$$K_{S_{H_o, L'}} = -\ln(I'/I_o) / L' \quad (27)$$

実験的に求めた同一品種の多数の  $K_{S_{H_o, L'}}$  値を用いて,  $L'$  と  $H_o$  およびこれらのべきを説明変数とした  $K_s$  の重回帰式を得た (山本, 1988; 山本ら, 1990). SCLEAS はパラメータとしてこの重回帰式の偏重回帰係数を使い, SCLEAS 内の変数である  $L'$  と  $H_o$  を説明変数として重回帰法で,  $K_s$  を発生させた (山本, 1988).

#### 6) 仮想グリッド内の各ブロックの光環境

3) に記したように, 1本の斜方柱がグリッドを1段下方に進む際, 幾つかのブロックを切り取る. 見方を変えれば, 1個のブロック (立方体) は, 同じ傾きをもつ何本かの斜方柱がこれを切りとることによって生じる多面体を寄せ集めたものといえる.

1本の斜方柱内の任意の段までの積算葉面積指数  $L'$  (10式) とその斜方柱光の直射光吸光係数  $K_{d_{H_o}}$  (24式) とを用いて, 斜方柱内の次の段の平行6面体に入射する直射光の割合  $D$  を計算できる (28式). ただし,  $H_o < 45^\circ$  の場合は, 斜方柱内の次の列の平行6面体に入射する直射光の割合と言い替えねばならない.

$$D = \exp(-K_{d_{H_o}} L') \quad (28)$$

この平行6面体を構成するいずれの多面体にも直射光は同じ割合 ( $D$ ) で入射するものとする.

SCLEAS の太陽光の直射光割合を計算するステップで, 一つの配列変数  $C1$  を用意する. この配列変数の要素には, 任意の多面体が属するブロックの位置 ( $x$ ,  $y$  および  $z$ ) を(9)式に当てはめて計算したブロックの通し番号 ( $i$ ) を用いる. 次に, その多面体が属する平行6面体に入射する直射光割合 (28式) とその多面体の  $V_r$  値との積を, この配列変数  $C1$  の  $i$  番目に加えた. そして, 太陽光線の斜方柱光が仮想グリッドを構成する全ブロックを通りすぎるまで上記の計算を繰り返すと, 配列

変数  $C1$  の  $i$  番目の値 ( $D_i$ ) は, 最終的に,  $i$  番目のブロックへ入射する太陽光の直射光の割合になる (29式).

$$D_i = \sum_{m=1}^{m_{\max}} D_m V_{r_m} = \sum_{m=1}^{m_{\max}} \exp(-K_{d_{H_o}} L'_m) V_{r_m} \quad (29)$$

ここで  $m$  は  $i$  番目のブロックを構成する  $m_{\max}$  個の多面体のうちの一つであることを示し,  $D_m$  はその多面体が属する平行6面体についての(28)式の値,  $V_{r_m}$  はその多面体の体積がブロック体積に占める割合,  $L'_m$  はその多面体を生じる斜方柱におけるその段手前までの積算葉面積指数である. ブロックを構成する多面体の総数である  $m_{\max}$  はブロックによって異なる. (29)式は  $D_i$  の直接的な計算式というより, SCLEAS のプログラムの計算アルゴリズムに従って最終的に定まる  $D_i$  値の「説明式」と考えていただきたい (31)~(33)式についても同様).

上記の配列変数のほかに, ブロックに入射する各種の散乱光の水平面強度とその散乱光がブロックに入射する割合 ( $<1$ ) との積を加える3種類の配列変数 ( $C2$ ,  $C3$  および  $C4$ ) を用意する. この計算原理 (強度と割合の積の合計) に従うと, これらの配列変数値の性格はブロックに入射する様々な方向からの光の水平面強度の合計値あるいは相加平均値にはならず, 入射する割合の重みをもって計算される, ブロック1個としての水平面強度の平均値 (加重相加平均値) になる.

太陽光線からなる1本の斜方柱光が, 途中の葉群中に吸収されながらも, 一部は透過し, あるいは, 葉に対し下向き反射することにより, グリッドの任意の段までに到達する (太陽光起因の二次散乱光が入射する) ときを考える. このとき, 水平面強度が  $I'$  に変わったとすると, 太陽光の水平面強度の減衰割合 ( $I'/I_{d_o}$ ) は(30)式で表現できる.

$$I'/I_{d_o} = \exp(-K_{S_{H_o, L'}} L') \quad (30)$$

ただし,  $I_{d_o}$  は植被外における太陽光線の水平面強度である.

この二次散乱光が斜方柱内のその段の平行6面体に入射する割合 (日陰部の割合) は1からこの平行6面体の(28)式の値 ( $D$ , すなわち, 日向部の割合) を差し引いたものに等しい ( $=1 - \exp(-K_{d_{H_o}} L')$ ). そして, 1個の平行6面体を構成するいずれの多面体にも同じ割合で日陰部が生じるものとする. 個々の多面体について,  $I'$  値, 日陰部の割合 ( $=1 - \exp(-K_{d_{H_o}} L')$ ) および多面体の  $V_r$  値の3者の積を, この多面体が属するブロックの通し番号 ( $i$ ) を要素とする配列変数  $C2$  に加えた. 太陽光線からなる斜方柱光が全ブロックを通りすぎると, 配

列変数C2の値は最終的にi番目のブロックにおける太陽光起因の二次散乱光水平面強度の加重相加平均値 ( $I_{os_i}$ ) になる (31式). (31式中には直接出てこないが, 同式は多面体の日向部に太陽光起因の二次散乱光が入射しないものとして, すなわち, その重み ( $1 - \exp(-Kd_{Ho}L'_m)$ ) が0として, 加重相加平均の計算を行うことを意味する.

$$I_{os_i} = I_{do} \sum_{m=1}^{m_{max}} (1 - \exp(-Kd_{Ho}L'_m)) V_{r_m} \exp(-K_{Sho}L'_m) \quad (31)$$

なお,  $m$ ,  $m_{max}$ ,  $V_{r_m}$  および  $L'_m$  の説明は(29式の場合と同じである.

次に, 天空光成分に関する配列変数 (C3 および C4) について記す. 一つの天空小区画からの平行光線の直射光が入射する割合は太陽光の(29式と同じものを用いて計算できる. そして, この計算を全天空区画分繰り返す. ただし, (29式が入射する割合を計算したのとは異なり, ここでは個々の多面体への直射光の入射する割合, 直射光の水平面強度および  $V_r$  値の3者の積を計算し, 多面体の属するブロックの通し番号を要素とする配列変数 C3に加算した. そしてこの計算を全天空区画からの平行光線について, それぞれの場合の全ブロックを通りすぎるまで繰り返すと, 配列変数 C3 は最終的にi番目のブロックにおける, 天空光が重複入射したとき (すなわち, 一次散乱光) の水平面強度の加重相加平均値 ( $I_{s1_i}$ ) になる (32式).

$$I_{s1_i} = \sum_{j=1}^{j_e} \sum_{k=1}^{k_e} \sum_{m=1}^{m_{max}} \exp(-Kd_{HoJK}L'_{JKm}) V_{r_{JKm}} I_{S_{JK}} \quad (32)$$

ここで,  $I_{S_{JK}}$  は天空区画からの平行光線の水平面強度である ((7式). また,  $m$  および  $m_{max}$  の説明は(29式の場合と同じである. (29式にはなかった  $Kd_{HoJK}$ ,  $L'_{JKm}$  および  $V_{r_{JKm}}$  の下付き文字の JK は, 1つの平行光線 (太陽光) を天空区画からの平行光線に置き換える役割をもつにすぎない.

配列変数 C4 を用意し, 太陽光起因の二次散乱光水平面強度 (31式) と同じ計算を全ての天空区画からの平行光線について, それぞれの場合の全ブロックを通りすぎるまで繰り返せば, 配列変数 C4 の値は最終的に天空光が重複入射したときのi番目のブロック1個としての, 天空光起因の二次散乱光の水平面強度の加重相加平均値 ( $I_{s2_i}$ ) になる.

$$I_{s2_i} = I_{S_{JK}} \sum_{j=1}^{j_e} \sum_{k=1}^{k_e} \sum_{m=1}^{m_{max}} \exp(1 - \exp(-Kd_{HoJK}L'_{JKm})) V_{r_{JKm}} \exp(-K_{ShoJK}L'_{JKm}) \quad (33)$$

ここで, 二次散乱光の吸光係数  $K_{ShoJK}L'_{JKm}$  の長い下付き文字は, (31式)の太陽光の二次散乱光の吸光係数 ( $K_{Sho}L'$ ) を, 天空区画からの平行光線に対応するものに置き換えたにすぎない. 他の下付き文字の説明は(32式と同じである.

上記をまとめると次のようになる. 太陽光と全ての天空区画からの平行光線について, 上記の計算を終えた後の4種類の配列変数値 (ブロック別加算値) は, それぞれ, 各ブロックに入射する太陽光の直射光割合 (C1), 太陽光起因の二次散乱光水平面強度のブロック平均値 (C2), 全天空区画からの平行光線 (一次散乱光) の直射光水平面強度のブロック平均値 (C3) および全天空区画からの平行光線が二次散乱光に変じた成分の水平面強度のブロック平均値 (C4) になる. C1~C4の配列変数値の計算過程を考えると, これらは空間における葉量の不均一分布および光の種類, 強さ, 方向などを総合的に反映した, 同一時刻の樹冠内光環境情報を一つ一つのブロックの刻みで保有するものと見なされる.

#### 7) 葉面の受光強度の計算方法

i番目のブロックの日向部葉の数は  $D_iB(i)$  の四捨五入値とした. 日向部の葉面の太陽光強度 ( $Idl'$ ) は個々の葉の傾斜角度 ( $\alpha$ ) と方位角度 ( $\beta$ ) を用いて(34式)により計算した.

$$Idl' = I_{do} | \cos \alpha + \sin \alpha \cot \theta \cos(\beta - Az) | \quad (34)$$

ここで  $\beta$  は疑似乱数値と360度の積で発生し,  $\alpha$  は葉の傾斜角度確率密度分布関数  $\Psi(\alpha)$  ((22式)を用いたモンテカルロ法で発生した.

配列変数 C2, C3およびC4の値はいずれもブロックへ入射する各散乱光の水平面強度での平均値であった. このうち, 日陰部葉の葉面受光強度にはC2, C3およびC4が関与する. 一方, 日向部葉の葉面受光強度には(34式)で計算される太陽直射光の葉面受光強度のほかにもC3およびC4が関与する.

上記のブロックごとの散乱光成分 (C2, C3 および C4) を単純に加算して, そのブロック内の葉面受光強度を計算しても, ほぼ良好な結果が得られるが, SCLEAS はブロック内の葉群の相互遮蔽, 葉の傾斜角度, 葉の方位角度および散乱光の入射方向別の不均一性を考慮して, 葉面受光強度の計算に一層の工夫を凝らした(山本, 1988). ブロック内の葉の分布がランダムであると仮定したので, 立方体3軸に沿って同じ数の葉層を持つ. たとえば, 1枚ならば1層, 2~8枚ならば2層, 9~27枚ならば3層とみなす. 当研究室の調査によれば, 樹冠における

1 辺が 15cm の立方体空間の葉数が約 10 枚までになる割合は、リングで約 76%, カキで約 81%, オウトウで約 78% およびセイヨウナシで約 72% であった (未発表). SCLEAS は、ブロック内の最上層の葉面の散乱光受光強度を計算したうえで、Beer-Lambert の式を用いて、この葉層による光強度減衰を同一ブロックの 1 層下の葉の葉面の散乱光受光強度に反映させ、最下層の葉層までこれを繰り返した. この場合の吸光係数  $K$  の性格が、ブロック内にランダムに分布する葉群に対し、全方向から入射する光の吸光係数の平均値であると見なし、以下の方法で  $K$  値を計算した. すなわち、5) に記した  $K_s$  の重回帰推定式 (山本, 1988; 山本ら, 1990) を用い、その説明変数の  $L'$  には 1 を、および、 $H_0$  に各天空区画からの平行光線の仰角 ( $Az_{JK}$ ) を用いて  $K_s$  値を計算した. そして全天空区画分の  $K_s$  値を平均して  $K$  とした.  $i$  番目のブロックの葉数 ( $B(i)$ ) の一枚一枚の葉について太陽直射光を含めて葉面の受光強度を計算するので、計算するごとに増える葉数を  $LN$  (ただし、 $1 \leq LN \leq B(i)$ ) とし、仮に、 $LN$  が  $\kappa B(i)^{2/3} < LN \leq (\kappa + 1) B(i)^{2/3}$  の範囲にあれば、ブロック内の積算葉面積指数  $LB$  は(35)式で計算できた.

$$LB = \kappa a B(i)^{2/3} / \text{ブロック底面積} \quad (35)$$

たとえば、 $B(i) = 8$  の場合、ランダム分布では 3 軸に 2 層になるが、このうち 3 枚目 ( $LN = 3$ ) の葉は、 $0 \cdot 8^{2/3} < LN \leq (0 + 1) \cdot 8^{2/3}$  の範囲にあるから、 $\kappa = 0$ 、したがって、 $LB$  は 0 になる. また、5 枚目 ( $LN = 5$ ) の葉は、 $1 \cdot 8^{2/3} < LN \leq (1 + 1) \cdot 8^{2/3}$  の範囲にあるから、 $\kappa = 1$  になり、したがって、 $LB$  は  $a \cdot 8^{2/3} / (\text{ブロック底面積})$  の値になる. すなわち、同一ブロックにおいて受光強度の計算対象になっている葉層より上に存在する葉の  $LB$  値を用いればよい.

1 つのブロックにおける日陰部の葉が全て水平であれば、葉面の散乱光受光強度 ( $Isl$ ) は(36)式で与えられる.

$$Isl = (Ios_i + Isl_i + Is2_i) \exp(-KLB) \quad (36)$$

水平でない場合でも、散乱光が全方向均等にブロックに入射すれば、 $Isl$  は個々の葉の傾斜角度  $\alpha$  に依存し、方位角度  $\beta$  に無関係に(37)式で与えられる.

$$Isl = (0.5 \cos \alpha + 0.5) (Ios_i + Isl_i + Is2_i) \exp(-KLB) \quad (37)$$

しかし、上記の二つの場合は極めて希である. 通常、ブロックへ入射する各散乱光は方向に関して不均一である. SCLEAS は(37)式の  $(0.5 \cos \alpha + 0.5)$  の部分を、ブロックへ入射する散乱光の方向に関する不均一の程度、葉の傾斜角度および葉の方位角度によってきまる修正係数

$K_q$  で置き換えた. この場合の  $K_q$  値は次のような机上実験を含む方法で与えた. すなわち、8 方角から入射する 8 本の平行光線を 1 組として、これを多数組用意した. これらの組の一つ一つは、8 本の入射光量の合計は等しいが、最も強く入射する方角 ( $Az_{max}$ ) をもち、かつ、それぞれの水平面光強度に関する入射方角間の分布の不均一の程度が 15 段階になるようにした. 各組 8 本の一つ一つが任意の  $\alpha$  および  $\beta$  の値をもつ 1 つの平面に当たる強さを(34)式により計算し、これを加算し (重複投射し)、1 つの平面の散乱光受光強度とした. そして、この計算を多数組の光データと多数の平面とを組み合わせて行い、平面の散乱光受光強度のデータを多数入手した. これとは別に、合計入射光量を上記と同じくして、8 方角から均等に入射する光が水平面 ( $\alpha = 0$ ) に当たるときの散乱光受光強度を計算した. そして、後者の値に対する前者の比を  $K_q$  とし、全ての平面の  $K_q$  値を計算した. この机上実験の結果を用いて、不均一の程度 (15 段階)、 $Az_{max}$ 、 $\alpha$  および  $\beta$  を説明変数とした  $K_q$  の重回帰推定式を作成した. そして、この偏重回帰係数を SCLEAS 内のパラメータとして用いた. 一方、SCLEAS の C2, C3 および C4 の計算ステップにおいて、ブロックに入射する散乱光水平面強度の方角別の積算をブロックごとに行うようにした. SCLEAS の葉面受光強度の計算ステップでは上記の方角別の積算値を用いて、各ブロックの  $Az_{max}$  と、不均一の程度を判別するとともに、これらとモンテカルロ法で発生した個々の葉の  $\alpha$  と  $\beta$  により  $K_q$  値を重回帰推定し、最終的に(38)式により日陰部の葉面受光強度を計算した.

$$Isl = K_q (Ios_i + Isl_i + Is2_i) \exp(-KLB) \quad (38)$$

日向部葉には(34)式で計算した太陽直射光の葉面受光強度 ( $Idl'$ ) に加えて C3 および C4 の散乱光が加わるが、この場合にも上記の日陰部葉の場合と同様に  $K_q$  を発生させ、日向部葉面受光強度 ( $Idl$ ) を計算した (39)式.

$$Idl = Idl' + K_q (Isl_i + Is2_i) \exp(-KLB) \quad (39)$$

なお、既報 (山本, 1988) の付録に掲載した上記の 15 段階の不均一分布と  $Az_{max}$  の求め方および重回帰推定式については一部印刷の誤りがあったので、その後の正誤表を本稿の付録に再掲載した.  $K_q$  の計算方法の詳細については既報 (山本, 1988) を参照されたい.

## 8) SCLEAS の計算過程の概要

SCLEAS の入力部分では、品種特有な諸パラメータおよび解析対象樹の樹冠内葉数分布のデータ (3 次元配列変数) を入力する. 次に各時刻の太陽光水平面強度 ( $Id_0$ )

および天空光水平面強度 ( $I_s$ ) を入力する。SCLEAS の出力部分では、各時刻における樹冠内全葉の葉面受光強度の瞬時分布や統計値を計算出力し、これを時刻数だけ繰り返し、最後に1日としての分布や統計値を出力する(第6図)。

各時刻の計算過程は以下の通りである。投射光関係の計算(1.の1)を参照)の後に、太陽光部分、天空光部分および葉面受光強度の順に進む。太陽光部分では C1 と C2 の配列変数への加算、天空光部分では C3 と C4 の配列変数への加算を行う。次に、これらの配列変数値

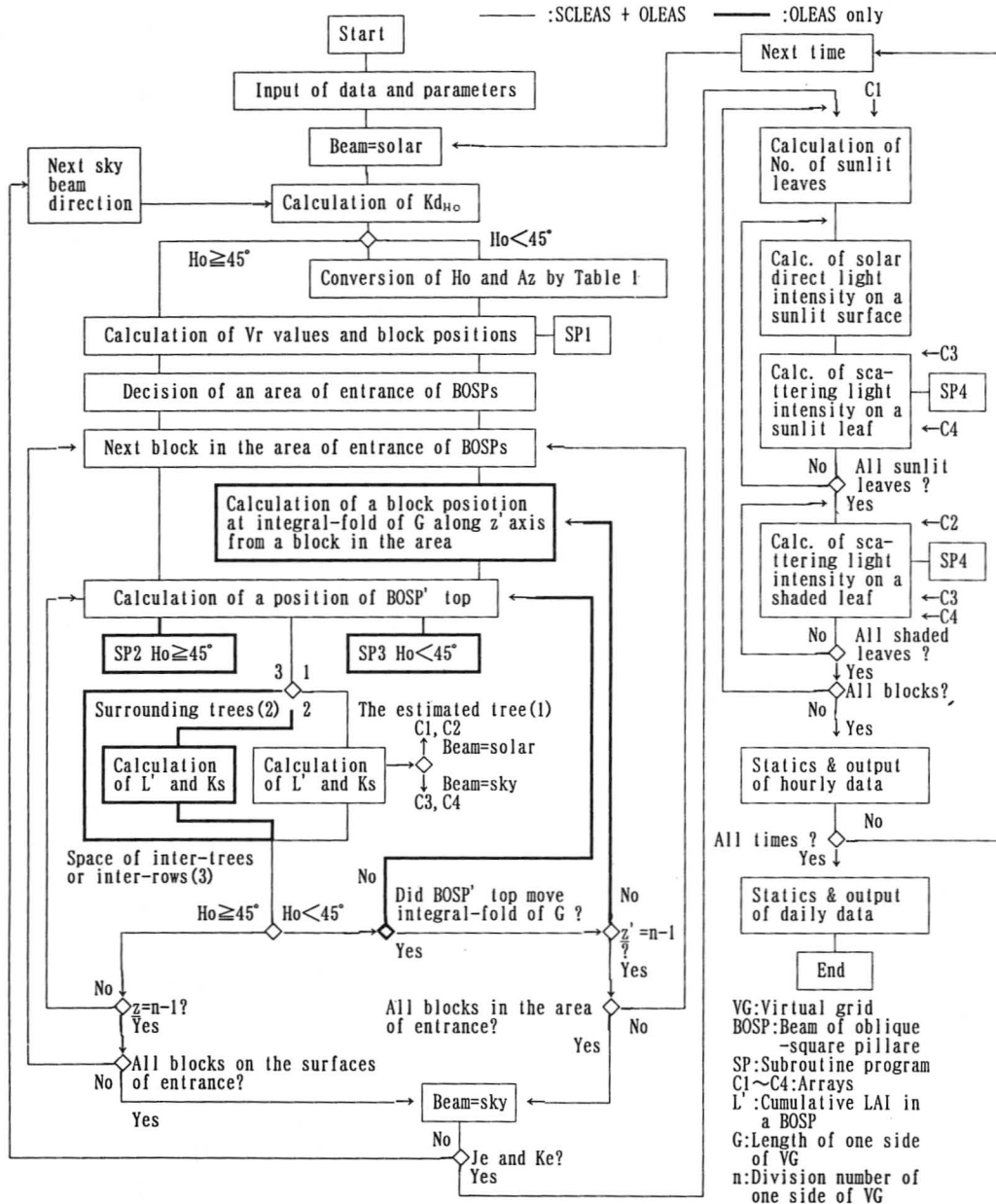


Fig. 6. A flow chart of the program of SCLEAS and OLEAS. Slender lines indicate SCLEAS and OLEAS, and bold lines indicate OLEAS only.

を用いてブロック内の一枚一枚の葉の葉面受光強度を計算する。

太陽光および各天空区画からの平行光線に関する計算行程の入口では直射光吸光係数の計算とともに、斜方柱と仮想グリッドとの交錯に関する計算(1.の3)を参照)を一度ずつ行い、 $V_r$  値群とブロックの位置群を計算記憶する。ただし、平行光線の仰角が $45^\circ$ 以下の場合、この計算に先立ち、グリッドの座標軸の変換およびこれに伴う仰角と方位角度の変換を行う。上記の記憶値を用い、同一の斜方柱光の全入射領域(1.の3)を参照)における一連の計算(1.の6)を参照)を繰り返し、 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  および  $C_4$  の配列変数への加算を行う。6)に記した計算に用いる斜方柱内の積算葉面積指数および二次散乱光吸光係数の値は斜方柱光がグリッド1段下方に進むたびに計算され、更新される(1.の4)および5)を参照)。

葉面受光強度の計算部分(1.の7)を参照)では、ブロックごと、 $C_1$  の配列変数値を用いて日向部葉数を計算する。次に、その葉面の太陽光受光強度を計算し、これに  $C_3$  および  $C_4$  による散乱光強度の計算結果を加え、日向部葉の葉面受光強度計算を行う。そして、これをブロック内の日向部葉数だけ繰り返す。ブロック内の残りの葉について、 $C_2$ 、 $C_3$  および  $C_4$  の配列変数値を用いて日陰部葉の葉面の受光強度を計算する。 $C_3$  および  $C_4$  の配列変数値が最初の時刻に計算されておれば(32)および(33)式)、残りの時刻の  $C_3$  と  $C_4$  の配列変数値を最初から計算する必要はなく、残りの時刻と最初の時刻の天空光の強さ( $I_s$ )の比例関係で簡単に与えることができる。なお、第6図の流れ図の中の太線部分はOLEASのみに関連するところである。

## 2. SCLEAS の検証方法

既報(山本, 1988)に記したように、樹冠内葉面受光強度分布シミュレーションモデル(山本, 1988)の検証用データは、セイヨウナシ‘ラ・フランス’あるいはカキ‘平核無’の鉢植え幼樹を数個を組み合わせて多種多様な人工樹冠を作り、これにグリッドをかぶせ、グリッドの中の各ブロックの葉数を数えながら、各時刻の投射光データとともに、一枚一枚の葉の葉面受光強度を測定したものであった。SCLEASは、印刷公表した上記モデルの一部の計算式を訂正し、また、使用方法の改良を施したものである。したがって、SCLEASの検証のためのデータは、上記モデルの検証用のデータをそのまま用いた。なお、検証用データの入手や使用パラメータなどの詳細

については既報(山本, 1988)を参照されたい。

## 3. 果樹園光環境解析システム (OLEAS) における解析方法

### 1) SCLEASをOLEASへ拡張するための条件

毎年必須の作業の整枝剪定を行う果樹栽培においては、他の作物に比較して、樹形・葉群構造の変化の自由度が大きい。果樹園内の光環境の改善の重要性に加え、整枝剪定の仕方は栽培者によって相当異なるため、樹形、樹冠形、葉群構造および栽植方式と果樹園光環境との相互関係に特に関心が高い。しかし、緒言に記したように、果樹園光環境の調査や解析の方法はこれまでほとんど確立していなかった。果樹園内のいずれの樹も樹冠形や葉群構造が互いに異なる場合、あるいは、広面積の自然の樹木植生の光環境の実態を評価する場合、面積全体としての葉群分布データを近似的に得ることができるならば、これを包む単一の仮想グリッドを使用して、SCLEASをそのまま利用することができる。しかし、SCLEASは立方体の仮想グリッドの使用をその条件とするため、それは巨大になる。たとえば、1haの果樹園をまるごと包む立方体の仮想グリッドをつくり、1辺が15cmの長さのブロックで構成すれば、合計約3億個の要素をもつ配列変数を用意せねばならない。また、 $V_r$  値やブロック位置の計算のための所要時間も相当長くなる。しかも、樹高が3mとすると、その97%が無駄になる。

筆者はSCLEASを作成した時点(1988年)から今日まで、これとは異なる原理の検討も含め、果樹園光環境の効率的な解析方法を模索してきた。その中で、上記の混然とした植物群落の光環境を解析することは実態調査にすぎないこと、および、同一の外部形態と内部構造をもつ果樹個体(あるいは数種の外部形態と内部構造をもつ果樹数個体を組み合わせたもの)を、任意の栽植様式のもとで繰り返し配置した果樹園モデルを対象に、その光環境を比較することこそが果樹園設計(樹冠形や栽植方式の選択)に役立つものと考えた。このためのSCLEASの利用の可能性を検討したところ、一定の工夫により、SCLEASと同じ大きさの仮想グリッドを操作しながら、SCLEASの機能を実質的に使用できることが判った。この考えをもとに果樹園光環境解析システム(OLEAS)を作成した。

上記の性格をもつ果樹園においては、繰り返し配置した単一あるいは数個の果樹個体の光環境だけを解析することで足りる。ただし、SCLEASをOLEASにまで拡張

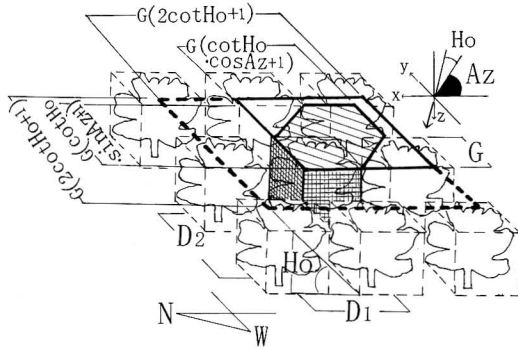


Fig. 7. Areas of light extinction brought out by neighbor fruit trees in the case of  $H_o \geq 45^\circ$  in an orchard model where the same fruit tree canopy is arranged with a tree space ( $D_1$ ) and a row space ( $D_2$ ). An area within a dotted line and that with slant lines indicates an area of light extinction for all  $A_z$ s and that for an  $A_z$ , respectively.

するときの必要条件は、光環境の推定対象樹と隣接樹との距離、すなわち、樹間距離（株間、 $D_1$ 、第7図、樹列が南北方向の場合）と樹列間距離（畝間、 $D_2$ 、第7図）の両者を推定対象樹を包む仮想グリッドの中のブロック1辺長の整数倍の長さにするることである。これにより、仮想グリッドのxおよびy座標の目盛の延長上で周辺樹の数量的情報を扱わことができ、仮想グリッドで一度計算した、 $V_r$  値群とブロック位置群のデータを、その外側で繰り返し使用することができる。

任意の  $H_o$  の平行光線が全ての方角 ( $A_z$ ) から入射すると、推定対象樹を中心に置く、長さ  $G(2\cot H_o + 1)$  を1辺とする正方形の中に存在する周辺樹の光強度減衰

の作用を受ける（第7および8図の太い点線内の領域）。 $H_o \geq 45^\circ$  の場合、この範囲は、最も広がっても、 $3G$  を1辺とする正方形であるから、隣接樹の範囲といえる（第7図）。 $H_o < 45^\circ$  の場合、この範囲は広くなり（ $H_o = 0$  のときは無限大になり）、多数の周辺樹による光強度減衰を受ける。しかし、 $A_z$  の定まった1本の平行光線の場合は、この範囲は両者とも平行6辺形となり、上記のものより大幅に縮小する（第7および8図の斜線領域）。 $H_o$  は太陽高度あるいは天空の各区画中心点の高度であるので、上記の範囲は、太陽光では推定時刻ごと、天空光では天空区画ごとで異なる。

## 2) 周辺樹による光強度減衰の計算アルゴリズム

SCLEAS で用いた推定対象樹を包む仮想グリッドの直交3軸をブロック1辺長で区切ってできる区間番号（ $0 \sim n-1$  の整数、略号は小文字表現の  $x, y$  および  $z$ ）のそれぞれの両側延長上に、同じ長さで区切る区間番号（ $-1$  以下および  $n$  以上の整数、略号は大文字表現の  $X, Y$  および  $Z$ ）がつけられているものとして話を進める。以後、 $X, Y$  および  $Z$  で決められる立方体ブロックについても、「ブロック」と記し、また、周辺樹を包むグリッドについても「グリッド」と記すことがある。そして、光環境の推定対象樹を包む仮想グリッドを「推定樹グリッド」と記す。

$H_o \geq 45^\circ$  の場合、推定樹グリッドの中で  $V_r$  値群とブロック位置群を一度計算し、推定樹グリッドの最上段（およびその延長）における入射領域（第7図）を設定するまでの計算プロセスは SCLEAS と同じである（2. を参照）。また、斜方柱光先端がブロック1辺長の刻みで  $z$  軸の正方向（下方）に伸びた任意の場所が、推定対象樹

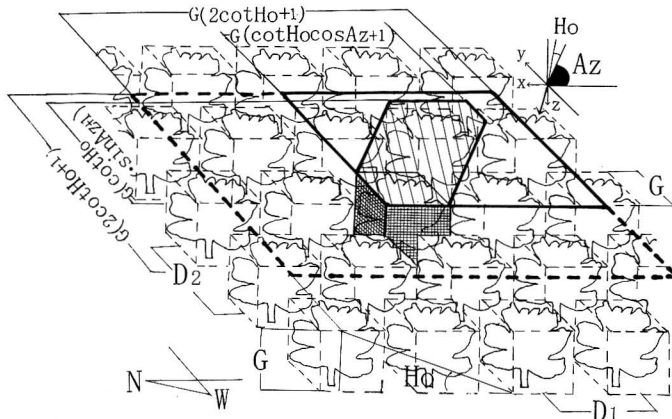


Fig. 8. Areas of light extinction brought out by surrounding fruit trees in the case of  $H_o < 45^\circ$  in an orchard model same as Fig. 7.

の中、周辺樹の中あるいはこれ以外の場所のいずれかにあるかの識別は、その場所の3軸上の区間番号、栽植距離 ( $D_1$  および  $D_2$ ) およびG値を用いた論理判断により行った。このためのサブルーチンプログラムの計算アルゴリズムは3)で説明する。入射領域(最上段)の1ブロックから斜方柱光が入射し、ブロック1段1段下がるたびに、そこで生じる一つ一つの多面体の所属するブロックについて上記の識別を行う。このブロックが隣接する3樹のいずれかのグリッドの中にあるときは、その樹のグ

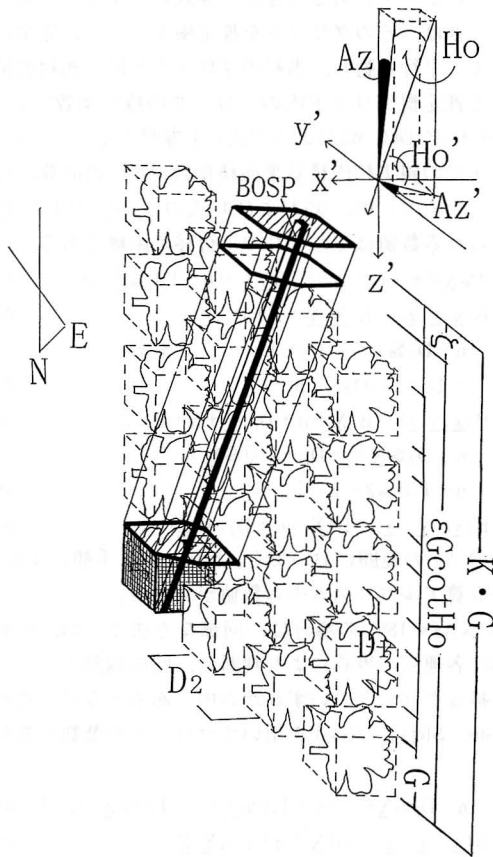


Fig. 9. An example of an area of entrance of BOSPs (an upper area with slant lines) at a remote plane with a distance of integral-fold of  $G (=KG)$  from the upper surface of  $VG$  (a lower area with slant lines) of  $x'y'z'$  co-ordinates in the case of  $Ho < 45^\circ$  and  $0^\circ \leq Az < 45^\circ$  (Fig. 4-A). The distance ( $KG$ ) is composed of  $\epsilon GcotHo$  (an area within a bold line) and the remainder ( $\zeta$ ). Here,  $\epsilon = |\cos Az|$  at  $0^\circ \leq Az < 45^\circ$ ,  $135^\circ \leq Az < 225^\circ$  and  $315^\circ \leq Az < 360^\circ$ , and  $\epsilon = |\sin Az|$  at the other ranges of  $Az$ .  $G$  is the length of a side of  $VG$ .

リッドを推定樹グリッドに完全に重なるまで平行移動することにより、当初のブロックと同じ位置に相当する推定樹グリッド内のブロックの持つ葉数  $B(x, y, z)$  を参照できる。この操作により、当初の多面体の中の葉数がわかり、したがって、そこまでの斜方柱内の積算葉面積指数 ( $L'$ ) を計算できる (1. の 4) を参照。

$Ho < 45^\circ$  の場合、 $Az$  の 8 領域に対応する新座標 ( $x'y'z'$ ) 系仮想グリッドを設定すること、 $Ho'$  と  $Az'$  を有する斜方柱が新座標系における推定樹グリッドを横切る際の、 $Vr$  値群とブロック位置群を計算すること、および、新座標系の推定樹グリッド最上段 (およびその延長面) の入射領域を設定することまでの計算プロセスは SCLEAS と同じである (2. を参照)。光強度減衰の作用を及ぼす周辺樹の範囲は、 $Ho \geq 45^\circ$  の場合が多くても隣接 8 樹であったのに対し、 $Ho < 45^\circ$  の場合は  $Ho$  の大きさにより隣接樹から無限大の距離 ( $Ho = 0^\circ$  のとき) まで変化する。したがって、周辺樹による光強度減衰の計算アルゴリズムは  $Ho \geq 45^\circ$  のときと大きく異なる。 $Ho < 45^\circ$  では、斜方柱光は推定樹グリッドの側面方向から入るが、SCLEAS の場合と異なり、入射領域面は推定樹グリッドの側面から水平方向に、周辺樹による光の減衰作用が起きることがなく、かつ、推定樹グリッド 1 辺長 ( $G$ ) の整数倍になる距離をとった平面である。すなわち、新座標系で考えると (第 9 図)、この距離は新座標系の推定樹グリッドの最上段 (およびその延長上) における入射領域 (第 9 図の下の斜線領域) の中の一つのブロック (正確にはその上面正方形の中心点) から、 $Ho'$  と  $Az'$  の角度を保ちながら、 $z'$  軸の負方向に取った  $\epsilon GcotHo$  の距離を最初に越える  $G$  の整数倍の距離 ( $= \epsilon GcotHo + \zeta$ ) である (第 9 図の上の斜線領域)。ここで、 $0^\circ \leq Az < 45^\circ$ ,  $135^\circ \leq Az < 225^\circ$  および  $315^\circ \leq Az < 360^\circ$  では  $\epsilon = |\cos Az|$ ,  $Az$  のこれ以外の領域では  $\epsilon = |\sin Az|$  であり、 $\zeta$  は  $G$  の整数倍の距離にするための残差である。この距離だけ  $z'$  軸に沿って負方向に平行移動すると、移動点の座標は移動前の座標に対し、 $x'$  座標は  $\Delta x'$  (40式)、および、 $y'$  座標は  $\Delta y'$  (41式) だけずれる。

$$\Delta x' = (\epsilon GcotHo + \zeta) cotHo' \sin Az' \quad (40)$$

$$\Delta y' = (\epsilon GcotHo + \zeta) cotHo' \cos Az' \quad (41)$$

この移動点の属する  $x'$  軸上と  $y'$  軸上の区間番号をもつ正方形を最初の入射口とする (第 9 図上部の斜線が引かれた平行 6 辺形の中の任意の正方形)。上記の  $\epsilon GcotHo + \delta$  の距離は推定樹グリッド 1 辺長 ( $=G$ ) の整数倍の長さをもつから、斜方柱光が  $z'$  軸に沿って正方向に  $G$

だけ移動するたびに、新たな入射口を設定すれば、推定樹グリッドの中で一度計算しておいた  $V_r$  値群とブロック位置群のデータを、ブロックの位置のずれを修正するだけで、繰り返し使用できる。この工夫が SCLEAS の OLEAS への拡張使用を可能にする。ただし、 $z'$  軸に沿って  $G$  の距離だけ平行移動した斜方柱の先端の底面正方形は、 $x'y'z'$  座標系が定めているブロックの上面正方形と一致しない。そこで、この底面正方形の中心点が属する  $x'y'z'$  座標系のブロックの上面正方形を次の出発点とする。したがって、グリッド分割数  $n$  回に 1 回の頻度で ( $G$  の距離だけ平行移動するたびに)、最大見積もっても、 $x'$  軸および  $y'$  軸方向にブロック 1 辺長の半分のずれ (アナログ値のデジタル化の際の誤差に相当) を生じる。このわずかな誤差を伴うが、 $V_r$  値とブロック位置の複雑な計算は 1 回ですむ。上記のようにして斜方柱光が  $z'$  軸に沿ってブロック 1 段ずつ下がるたびに、そこで生じる多面体の一つ一つについて、その所属するブロックが、周辺樹のグリッドの中、樹間空間あるいは樹列間空間のいずれかにあるのかを識別せねばならない。このためのサブルーチンプログラムの計算アルゴリズムは 4) で説明する。このブロックが周辺樹のグリッドの中にある場合、これが推定対象樹から何樹目および何樹列目であるかを計算する。そして、その樹を包むグリッドを推定樹グリッドに完全に重なるまで平行移動すると、当初の斜方柱光先端部の多面体の属するブロックの位置 ( $\underline{X}$ ,  $\underline{Y}$  および  $\underline{Z}$ ) に相当する推定樹グリッド内のブロックの位置 ( $\underline{x}$ ,  $\underline{y}$  および  $\underline{z}$ ) がわかるので、そのブロックの葉数  $B(\underline{x}, \underline{y}, \underline{z})$  を参照できる。この操作により、斜方柱内の積算葉面積指数 ( $L'$ ) を計算できる (1. の 4) を参照)。ただし、 $H_o \geq 45^\circ$  の場合と異なり、斜方柱光先端部の多面体の属するブロックの位置 ( $\underline{X}$ ,  $\underline{Y}$  および  $\underline{Z}$ ) は新座標系で表現されているので、平行移動の前に、これを第 1 表により旧座標系におけるブロックの位置 ( $\underline{X}$ ,  $\underline{Y}$  および  $\underline{Z}$ ) に置き換え、次に平行移動したときのブロックの位置 ( $\underline{x}$ ,  $\underline{y}$  および  $\underline{z}$ ) を用いてブロック葉数  $B(\underline{x}, \underline{y}, \underline{z})$  を参照する。斜方柱光の先端部が周辺樹のグリッドの中にあるときは、そこまでの積算葉面積指数 ( $L'$ ) のみを計算するが、推定樹グリッドの中に進入してからは、 $L'$  とともに  $C1$ ,  $C2$ ,  $C3$  および  $C4$  の配列変数値の計算を行う。斜方柱光先端部が樹間空間あるいは樹列間空間にあるときは何も行わず、同先端部を  $z'$  軸に沿ってブロック 1 段分下げる。

### 3) $H_o \geq 45^\circ$ の場合の斜方柱光先端部の位置の識別および推定樹グリッドへの重ね合わせのための計算アルゴリズム

以下は  $H_o \geq 45^\circ$  の場合である。  $0 \leq A_z < 90^\circ$  の場合、グリッド最上段の入射領域の 1 ブロックから斜方柱光が入射し、ブロック 1 段ずつ下がるたびに、斜方柱光先端部の多面体が属するブロックの位置が、隣接する 3 樹のグリッドの一つの中にあるかどうかを判断する (それぞれ (42), (44) および (46) の各連立不等式)。これが 3 グリッドのいずれかの中にある (連立不等式のいずれかが成立する) ときは、そのグリッドを推定樹グリッドに完全に重なるまで平行移動し、当初のブロックと同じ相対的位置にある推定樹グリッド内のブロックの持つ葉数  $B(x, y, z)$  (それぞれ (43), (45) および (47) 式) を参照することにより、そこまでの斜方柱内積算葉面積指数 ( $L'$ ) の計算に役立てる。ただし、(43), (45) および (47) 式の  $\underline{X}$ ,  $\underline{Y}$  および  $\underline{Z}$  に加えられる数値はそれぞれの平行移動距離である。

$$0 \leq \underline{X} < n-1, -n-D_1 \leq \underline{Y} < -D_1-1, 0 \leq \underline{Z} < n-1 \quad (42)$$

$$B(\underline{x}, \underline{y}, \underline{z}) = B(\underline{X}, \underline{Y} + n + D_1, \underline{Z}) \quad (43)$$

$$-n-D_2 \leq \underline{X} < -D_2-1, -n-D_1 \leq \underline{Y} < -D_1-1, 0 \leq \underline{Z} < n-1 \quad (44)$$

$$B(\underline{x}, \underline{y}, \underline{z}) = B(\underline{X} + n + D_2, \underline{Y} + n + D_1, \underline{Z}) \quad (45)$$

$$-n-D_2 \leq \underline{X} < -D_2-1, 0 \leq \underline{Y} < n-1, 0 \leq \underline{Z} < n-1 \quad (46)$$

$$B(\underline{x}, \underline{y}, \underline{z}) = B(\underline{X} + n + D_2, \underline{Y}, \underline{Z}) \quad (47)$$

以下の  $A_z$  の範囲においても、上記と同じ手順によるが、その計算アルゴリズム中の数値が異なる。

$90^\circ \leq A_z < 180^\circ$  の場合は、同様な方法で、(48), (50) および (52) の各連立不等式により判断し、同先端部のブロックが隣接 3 グリッドのいずれかの中にあるときは、それぞれ、(49), (51) および (53) 式を用いてブロックの葉数を参照する。

$$-n-D_2 \leq \underline{X} < -D_2-1, 0 \leq \underline{Y} < n-1, 0 \leq \underline{Z} < n-1 \quad (48)$$

$$B(\underline{x}, \underline{y}, \underline{z}) = B(\underline{X} + n + D_2, \underline{Y}, \underline{Z}) \quad (49)$$

$$-n-D_2 \leq \underline{X} < -D_2-1, n+D_1 \leq \underline{Y} < 2n+D_1-1, 0 \leq \underline{Z} < n-1 \quad (50)$$

$$B(\underline{x}, \underline{y}, \underline{z}) = B(\underline{X} + n + D_2, \underline{Y} - n - D_1, \underline{Z}) \quad (51)$$

$$0 \leq \underline{X} < n-1, n+D_1 \leq \underline{Y} < 2n+D_1-1, 0 \leq \underline{Z} < n-1 \quad (52)$$

$$B(\underline{x}, \underline{y}, \underline{z}) = B(\underline{X}, \underline{Y} - n - D_1, \underline{Z}) \quad (53)$$

$180^\circ \leq A_z < 270^\circ$  の場合は、同様な方法で、(54), (56) および (58) の各連立不等式により判断し、同先端部のブロックが隣接 3 グリッドのいずれかの中にあるときは、それぞれ、(55), (57) および (59) 式を用いてブロックの葉数を参照



する。

$$n+D_2 \leq \underline{X} < 2n+D_2-1, 0 \leq \underline{Y} < n-1, 0 \leq \underline{Z} < n-1 \quad (54)$$

$$B(\underline{x}, \underline{y}, \underline{z}) = B(\underline{X}-n-D_2, \underline{Y}, \underline{Z}) \quad (55)$$

$$n+D_2 \leq \underline{X} < 2n+D_2-1, n+D_1 \leq \underline{Y} < 2n+D_1-1, 0 \leq \underline{Z} < n-1 \quad (56)$$

$$B(\underline{x}, \underline{y}, \underline{z}) = B(\underline{X}-n-D_2, \underline{Y}-n-D_1, \underline{Z}) \quad (57)$$

$$0 \leq \underline{X} < n-1, n+D_1 \leq \underline{Y} < 2n+D_1-1, 0 \leq \underline{Z} < n-1 \quad (58)$$

$$B(\underline{x}, \underline{y}, \underline{z}) = B(\underline{X}, \underline{Y}-n-D_1, \underline{Z}) \quad (59)$$

$270^\circ \leq A_z < 360^\circ$  の場合も、同様な方法で、(60)、(62)および(64)の各連立不等式により判断し、隣接3グリッドのいずれかの中にあるときは、それぞれ、(61)、(63)および(65)式を用いてブロックの葉数を参照を計算する。

$$n+D_2 \leq \underline{X} < 2n+D_2-1, 0 \leq \underline{Y} < n-1, 0 \leq \underline{Z} < n-1 \quad (60)$$

$$B(\underline{x}, \underline{y}, \underline{z}) = B(\underline{X}-n-D_2, \underline{Y}, \underline{Z}) \quad (61)$$

$$n+D_2 \leq \underline{X} < 2n+D_2-1, -n-D_1 \leq \underline{Y} < -D_1-1, 0 \leq \underline{Z} < n-1 \quad (62)$$

$$B(\underline{x}, \underline{y}, \underline{z}) = B(\underline{X}-n-D_2, \underline{Y}+n+D_1, \underline{Z}) \quad (63)$$

$$0 \leq \underline{X} < n-1, -n-D_1 \leq \underline{Y} < -D_1-1, 0 \leq \underline{Z} < n-1 \quad (64)$$

$$B(\underline{x}, \underline{y}, \underline{z}) = B(\underline{X}, \underline{Y}+n+D_1, \underline{Z}) \quad (65)$$

#### 4) $H_o < 45^\circ$ の場合の斜方柱光先端部の位置の識別および推定樹グリッドへの重ね合わせのための計算アルゴリズム

$H_o \geq 45^\circ$  のときは、 $A_z$  の各範囲につき、隣接3樹に限定できたので、3組の連立不等式のそれぞれの成立の可否を逐一調べることで対処した。しかし、 $H_o < 45^\circ$  の場合は上記の限定はできない。そこで、斜方柱光先端部の1つの多面体が所属するブロックの区間番号 ( $\underline{X}$ ,  $\underline{Y}$  および  $\underline{Z}$ )、樹間距離  $D_1$ 、樹列間距離  $D_2$  およびグリッド分割数  $n$  を用いて、このブロックが推定対象樹の周辺のだこの小領域の中にあるかを判別するための変数  $TN$  および  $RN$  を最初に計算する。この小領域は片隅に1本の周辺樹のグリッドの底面 (正方形) を置き、グリッド間空間の底面 (L字形) とでできる矩形である。次に、この変数 ( $TN$  および  $RN$ ) により決まる小領域の片隅と推定樹グリッドとの間の距離だけ平行移動した後に、上記の先端部のブロックの小領域内における位置 (グリッドの中か外か) を明らかにする。なお、上記の方法の代わりに、 $TN$  と  $RN$  を用いて周辺樹グリッドの底面を最初から決め、そのブロックがこの底面の上にあるグリッドの中か外かを判別してから平行移動する方式も考えられたが、計算所要時間の関係から前者によった。

$0^\circ \leq A_z < 90^\circ$  の場合、 $|\underline{Y}-n| / (D_1+n)$  の剰余が0のときはこの商 (整数)  $-1$ 、あるいはこの剰余が0で

ないときはこの商 (整数) を  $TN$  とし、一方、 $|\underline{X}-n| / (D_2+n)$  の剰余が0のときはこの商 (整数)  $-1$ 、あるいはこの剰余が0でないときはこの商 (整数) を  $RN$  とする。このようにすると、斜方柱光先端部のブロックは、推定対象樹から樹列に沿って南側の  $TN$  番目の樹から  $TN+1$  番目の樹の手前の境界までの範囲にあり、また、推定対象樹から樹列垂直方向に沿って東側の  $RN$  番目の樹列から  $RN+1$  番目の樹列の手前の境界までの範囲にあると見なされる。次に、3)と同様に、推定樹グリッドへの重ね合わせを行い、当初のブロックと同じ相対的位置にある推定樹グリッド内のブロックの持つ葉数を参照し、そこまでの斜方柱内積算葉面積指数 ( $L'$ ) の計算に役立てる。このための平行移動距離は、 $x$  軸に沿って  $(D_2+2)RN$  および  $y$  軸に沿って  $(D_1+n)TN$  であり、 $z$  軸は不変である。したがって、平行移動した場合に該当するブロックの葉数  $B(\underline{x}, \underline{y}, \underline{z})$  は(66)式で与えられる。

$$B(\underline{x}, \underline{y}, \underline{z}) = B(\underline{X} + (D_2+n)RN, \underline{Y} + (D_1+n)TN, \underline{Z}) \quad (66)$$

ただし、上記の平行移動は周辺樹のグリッドを含む矩形の小領域内の一つのブロックの平行移動であるので、移動先が推定樹グリッドの外側に相当したときは、斜方柱光先端部は小領域の中の周辺樹のグリッドの中には存在せず、残りの空間 (樹間空間あるいは樹列間空間) に存在することになる。そのブロックには葉は存在しないので、光強度減衰の作用を及ぼさないと見なすものである。以下の  $A_z$  の範囲においても上記と同じ手順によるが、その計算アルゴリズム中の数値は異なる。

$90^\circ \leq A_z < 180^\circ$  の場合、 $\underline{Y} / (D_1+n)$  の商 (整数) を  $TN$  とし、一方、 $|\underline{X}-n| / (D_2+n)$  の剰余が0のときはこの商 (整数)  $-1$  あるいはこの剰余が0でないときはこの商 (整数) を  $RN$  とする。このようにすると、斜方柱光の先端部は推定対象樹から樹列に沿って北側の  $TN+1$  番目の樹の手前の境界から  $TN$  番目までの範囲にあり、また、推定対象樹から樹列垂直方向に沿って東側の  $RN$  番目の樹列から  $RN+1$  番目の樹列の手前の境界までの範囲にあると見なされる。上記の重ね合わせのための平行移動距離は、 $x$  軸に沿って  $(D_2+2)RN$  および  $y$  軸に沿って  $-(D_1+n)TN$  であり、 $z$  軸は不変であり、該当するブロックの葉数  $B(\underline{x}, \underline{y}, \underline{z})$  は(67)式で与えられる。

$$B(\underline{x}, \underline{y}, \underline{z}) = B(\underline{X} + (D_2+n)RN, \underline{Y} - (D_1+n)TN, \underline{Z}) \quad (67)$$

$180^\circ \leq A_z < 270^\circ$  の場合、 $\underline{Y} / (D_1+n)$  の商 (整数) を  $TN$  とし、一方、 $\underline{X} / (D_2+n)$  の商 (整数) を  $RN$  とする。このようにすると、斜方柱光の先端部は推定対象樹から

樹列に沿って北側の TN+1 番目の樹の手前の境界から TN 番目の樹までの範囲にあり、一方、推定対象樹から樹列垂直方向に沿って西側の RN+1 番目の樹列の手前の側の境界から RN 番目の樹列のまでの範囲にある。また、重ね合わせのための平行移動距離は、x 軸に沿って  $-(D_2+2)RN$  および y 軸に沿って  $-(D_1+n)TN$  であり、z 軸は不変であり、該当するブロックの葉数  $B(x, y, z)$  は68式で与えられる。

$B(x, y, z)$  は68式で与えられる。

$$B(x, y, z) = B(\underline{x} - (D_2 + n)RN, \underline{y} - (D_1 + n)TN, \underline{z}) \quad (68)$$

$270^\circ \leq Az < 360^\circ$  の場合、 $|\underline{y} - n| / (D_1 + n)$  の剰余が 0 のときはこの商（整数）-1 あるいはこの剰余が 0 でないときはこの商の整数部分を TN とし、一方、 $\underline{x} / (D_2 + n)$  の商（整数）を RN とする。このようにすると、斜方柱光の先端部は推定対象樹から樹列に沿って南側の

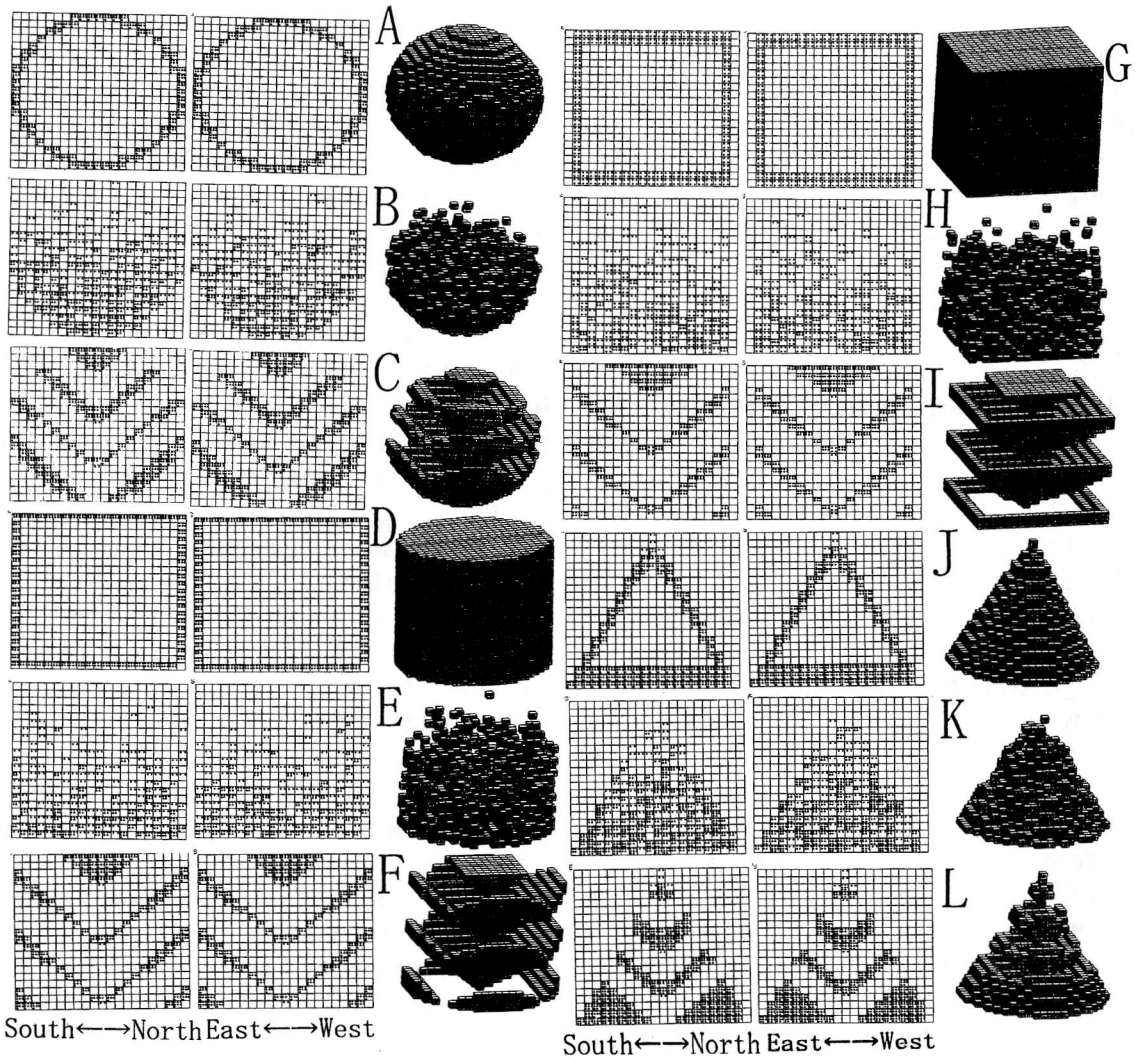


Fig. 10. Twelve and simple fruit tree crown models which were constructed by combining 4 solid bodies (sphere, circular cylinder, rectangular parallelepiped and circular cone) with 3 internal canopy structures (empty, clustery layers and removal of 3 inverted-pyramidal layers). The tests of OLEAS were conducted against 96 orchard models which were constructed by arranging the each fruit tree crown model with 8 planting systems (see Table 4).

TN 番目の樹から TN+1 番目の樹の手前の境界までの範囲にあり、また、推定対象樹から樹列垂直方向に沿って西側の RN-1 番目の樹列の手前の境界から RN 番目の樹列までの範囲にある。また、重ね合わせのための平行移動距離は、x 軸に沿って  $-(D_2+2)RN$  および y 軸に沿って  $(D_1+n)TN$  であり、z 軸は不変であり、該当するブロックの葉数  $B(\underline{x}, \underline{y}, \underline{z})$  は 69 式で与えられる。

$$B(\underline{x}, \underline{y}, \underline{z}) = B(\underline{x} - (D_2+n)RN, \underline{y} + (D_1+n)TN, \underline{z}) \quad (69)$$

### 5) OLEAS の計算過程の概要

上記の 2), 3) および 4) は、推定樹グリッドへ向う 1 本の斜方柱光に関わる減衰を準備する部分である。すなわち、この部分では、1 本の斜方柱内における、周辺樹の葉層からなる積算葉面積指数 (L) の計算のみを行う。斜方柱光が推定樹グリッド内に進入するときから、SCLEAS の場合となら変わらず、配列変数 C1, C2, C3 および C4 の計算を始める。ただし、斜方柱光の先端が周辺 (あるいは隣接) 樹内にあるかどうかの論理演算を含む計算、推定樹グリッドへの重ね合わせのための計算および  $Ho < 45^\circ$  の場合の斜方柱光の入射口を遠く離れたところに設定することなどが新たに加わる (第 6 図の太線を参照)。そして、上記の行程を SCLEAS と同様に全ループ分繰り返す (第 6 図)。

### 4. 単純な樹冠モデルから構成される果樹園モデルに対する OLEAS による解析試験の方法

OLEAS による解析結果を理解し易くするため、複雑な樹形や葉群構造をもつ実際の樹冠の使用を避けて、極めて単純な樹冠を対象に OLEAS の解析試験を行った。樹形・葉群構造構築プログラム (山本, 1998) により、4 種類の樹冠形 (球, 円柱, 直方体および円錐体) と 3 種類の葉群構造 (中空, クラスター構造および倒立した四角錐状の 3 層を重ねて除去, 山本, 1998) とを組み合せ、12 個の樹冠モデル (第 10 図) を作成した。樹高 (葉層の厚さ) を 3.15m, 1 樹の葉数を 12000 枚とした (第 2 表)。その他の生態学的特性値もできるだけ等しくするように上記プログラム上で設定したが、立体が積木構造であること、ならびに、それぞれの葉群構造を作り出すためにブロック単位で葉層を除去したので (山本, 1998), 樹冠占有面積 (AOLC), 葉層樹冠体積 (VLC), 樹冠占有面積当たり葉面積指数 (LAI<sub>c</sub>) および平均葉面積密度 (MLAD) は必ずしも等しくはならなかった (第 2 表)。この樹冠モデルのそれぞれを、8 種類の栽植様式、すなわち、樹間距離×樹列間距離として、3.15m×3.15m, 3.15m×3.75m, 3.15m×4.5m, 3.75m×4.5m, 4.5m×

5.25m, 4.5m×9m, 9m×9m, および無限大×無限大 (独立樹) にしたときに生じる合計 96 種類の果樹園モデルを対象に、晴天と曇天の典型的な投射光データ (第 3 表)

Table 2. Leaf canopy thickness (LCT), land area occupied by leaf canopy (AOLC), total leaf number (TLN), volume of leaf canopy (VLC), leaf area index per AOLC (LAI<sub>c</sub>) and mean leaf area density (MLAD) of 12 species of fruit tree crown models used in the tests of the OLEAS. Species of fruit tree crown model (A~L) refer to Figure 10.

Tree crown models	LCT	AOLC	TLN	VLC	LAI <sub>c</sub>	MLAD
	cm	m <sup>2</sup>		m <sup>3</sup>		cm <sup>-1</sup>
A	315	7.852	12000	5.190	3.056	0.0462
B	315	7.605	12000	5.231	3.155	0.0458
C	315	7.672	12000	5.231	3.128	0.0458
D	315	7.852	12000	5.946	3.056	0.0403
E	315	7.785	12000	5.096	3.082	0.0471
F	315	7.852	12000	5.096	3.056	0.0471
G	315	8.122	12000	9.004	2.954	0.0266
H	315	8.055	12000	5.946	2.979	0.0403
I	315	8.122	12000	5.946	2.954	0.0403
J	315	7.492	12000	5.136	3.203	0.0467
K	270	7.200	12000	4.978	3.333	0.0482
L	315	7.492	12000	4.978	3.203	0.0482

Table 3. Diurnal data of direct solar PPFD (I<sub>do</sub>, unit:  $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) and sky PPFD (I<sub>s</sub>) at horizontal plane on a clear sunny day or a typically clouded day which were used in the test of OLEAS. These data were obtained in the end of July at Tsuruoka and modified to be symmetrical about noon.

Hour time of a day	Bright sky		Overcast sky	
	I <sub>do</sub>	I <sub>s</sub>	I <sub>do</sub>	I <sub>s</sub>
6a.m.	40.9	125.0	0	80.1
7a.m.	141.8	256.9	0	274.3
8a.m.	354.4	346.3	0	370.2
9a.m.	594.9	416.9	0	365.3
10a.m.	942.5	462.9	0	444.9
11a.m.	1334.9	467.8	0	650.3
12a.m.	1493.9	446.8	0	725.0
1p.m.	1334.9	467.8	0	650.3
2p.m.	942.5	462.9	0	444.9
3p.m.	594.9	416.9	0	365.3
4p.m.	354.4	346.3	0	370.2
5p.m.	141.8	256.9	0	274.3
6p.m.	40.9	125.0	0	80.1

を与え、果樹園光環境を解析した。

なお、OLEASに必要な作物パラメータはリンゴ‘ふじ’のもの（山本ら，1990）を用いた。また、グリッド分割数は21（ブロック1辺長は15cm）、および、天空分割数は48とした。

## 結果および考察

### 1. SCLEASの検証結果

セイヨウナシ‘ラ・フランス’およびカキ‘平核無’から得られた検証用実測データ（全葉の毎時の葉面受光強度の平均値，山本，1988）と既報（山本，1988）の正誤表により修正を施したプログラム（SCLEASと同等のもの）による推定結果との間の1:1線は良好であった（第11図）。ただし、既報（山本，1988）の場合の1:1線とさほど変わらなかった。この理由として、 $H_o < 45^\circ$ の太陽光のもとでは、 $H_o'$ 値と $A_z'$ 値の一部が変わっても、朝夕の太陽光が弱いうえに、全光に占める太陽光成分の比率が低かったため、その影響度は小さくなったものと考えられる。また、天空光については修正対象が $H_o < 45^\circ$ の天空光に限られたこと、および、光線の方向が違って重複投射のため、その影響度が薄められ、全

体（平均値）に及ぼす影響は小さくなったものと考えられる。

本検証実験に用いた天空分割数は48であり、グリッド分割数は10であった。SCLEASは天空分割数を増やすことにより天空散乱光の近似性を、また、葉の大きさを考慮しながらグリッド分割数をある程度増やすことにより植被の外形・内部構造の近似性を高めることができるから、大容量の配列変数の使用が可能で高速のCPUをもった計算機を利用することにより、推定精度の向上が可能であると思われる。

### 2. SCLEASの今後の改良点

ブロック内小空間の葉層数、葉の傾きおよび放射の取扱いは、ここで扱ったもの以外に、各作物の特徴を活かした創意工夫やブロックの大きさの変更などが必要であると思われる。また、ブロック内の葉の分布をランダムと仮定したが、実際には必ずしもランダムではない。今後、実際の葉分布の近似的再現方法およびブロック内の葉面受光強度の計算方法をさらに改良する必要がある。ただし、 $K_q$ 値（1.の7）を参照）そのものは広い範囲に分布しないので（付録の第Ⅲ表を参照）、樹冠内光環境はC1, C2, C3およびC4の配列変数値（1.の6）を参照）によって実質的に決定されるといえる。

このほかに、果樹ではさほど問題にならないと思われるが、葉層の深さに伴い、葉の傾斜角度分布が大きく変化する場合には、対象作物について経験的に求めた葉の傾斜角度分布の変化に関するパラメータを利用する方法も検討したい。たとえば、積算葉面積指数を計算するたびに、葉の傾斜角度確率密度分布関数（22式）の値を更新し、直射光の吸光係数 $K_d$ 値の計算やモンテカルロ法による葉の傾斜角度の発生に反映させるなどの工夫を検討したい。また、散乱光の減衰係数 $K_{SHo.L'}$ については、よりいっそう正確な値の入手方法を検討したい。

### 3. OLEASの検証およびOLEASによる解析試験の結果

OLEASの検証実験のためには、全く同じ樹を多数配植せねばならないから、その材料の準備は極めて困難である。OLEASは $H_o = 0^\circ$ のとき計算不能になり、また、 $H_o < 45^\circ$ のとき、仮想グリッドの外部における斜方柱光の光軸のわずかなずれが生ずるが、この点を除くと、周辺（隣接）樹の葉群による光強度減衰をSCLEASと全く同じ原理で計算する。したがって、OLEASはSCLEASの検証結果に見られた有効性をほとんどそのまま保持するものと考えられる。なお、推定時刻を選ぶことにより、

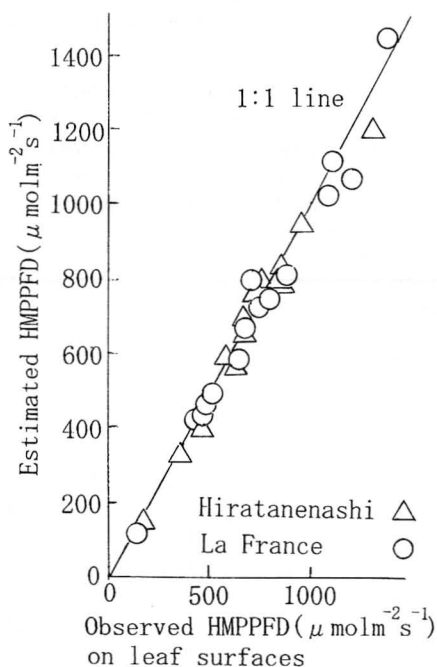


Fig. 11. Relations between hourly mean PPFDs (HMPPFDs) measured and HMPPFDs estimated by the SCLEAS.

Table 4. Estimated results by OLEAS of daily mean PPFD on leaf surfaces (DMPPFD, unit:  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) of 96 species of orchard models (12 species of fruit tree crown models  $\times$  8 planting systems) under 2 weathers.

Fruit tree crown models <sup>z</sup>	Weathers	Planting systems (Tree space $\times$ Row space)							
		3.15m $\times$ 3.15m	3.15m $\times$ 3.75m	3.15m $\times$ 4.5m	3.75m $\times$ 4.5m	4.5m $\times$ 5.25m	4.5m $\times$ 9m	9m $\times$ 9m	$\infty$ m $\times$ $\infty$ m <sup>y</sup>
A	Fine	348.5	353.4	353.8	365.4	367.8	371.8	375.9	376.8
B		336.9	337.9	337.7	337.7	341.1	343.2	345.2	345.5
C		356.7	358.7	358.9	365.0	366.6	369.3	372.4	373.1
D		339.7	354.4	361.0	383.6	400.2	405.9	410.4	412.1
E		335.4	339.9	340.9	350.8	353.1	355.0	356.6	356.9
F		361.0	368.3	371.1	384.9	392.3	396.3	399.8	400.8
G		325.7	336.8	341.6	361.9	373.4	378.1	382.5	384.0
H		341.8	345.4	346.1	354.0	355.9	357.8	359.6	359.9
I		367.2	374.6	376.1	391.2	396.6	400.5	404.2	405.2
J		320.3	320.6	320.8	321.5	322.4	323.6	324.8	325.0
K		300.7	300.4	300.0	300.2	300.5	301.5	302.3	302.4
L		314.3	314.5	314.6	315.0	315.7	316.4	317.5	317.4
A	Cloudy	169.1	170.4	169.8	172.7	174.1	176.4	180.8	181.1
B		166.7	166.4	165.6	166.0	165.9	167.1	169.4	169.4
C		173.1	173.3	172.8	174.0	174.9	176.2	179.6	179.7
D		159.3	164.6	167.5	173.6	179.0	182.5	187.2	188.1
E		160.0	161.4	161.5	163.8	164.6	165.8	167.6	167.7
F		172.5	175.0	175.8	179.1	181.5	183.8	187.6	188.1
G		157.3	162.6	164.8	170.8	175.9	178.9	183.7	184.7
H		160.7	161.7	161.5	163.2	164.1	165.2	167.2	167.3
I		174.2	176.8	176.6	179.8	181.4	183.6	187.8	188.2
J		152.4	152.2	151.9	152.4	152.9	153.5	154.8	154.9
K		146.7	146.1	145.4	145.4	145.3	145.9	146.8	146.8
L		149.5	149.2	149.0	149.1	149.4	149.8	150.7	150.7

<sup>z</sup> Refer to Fig. 10.<sup>y</sup> An isolated tree.

$H_0=0^\circ$  のときの計算不能は避けられる。

OLEAS の直接的検証はできなかったため、OLEAS による解析結果の中味を検討することにより、この性能を評価したい。12種の単純な樹冠モデル (第10図) から構成される果樹園モデルの推定樹全葉の葉面光合成有効光量子束密度 (PPFD) の日平均値 (DMPPFD) を晴天日について比較すると (第4表)、ほとんどの樹冠モデルで栽植密度の上昇に伴う DMPPFD の減少が現れた。葉群構造が中空の場合、独立樹に対する密植園 (3.15m  $\times$  3.15m 植え) の DMPPFD の減少割合は円柱で17.6%、直方体で15.1%、球で7.5%および円錐体で1.4%であった (それぞれ、第4表の上段の D, G, A および J)。葉群構造がクラスター化あるいは倒立した四角錐を3層除去したもので、DMPPFD の減少割合はこれより低かったが、似た傾向が見られた (第4表上段)。曇天日の推

定結果にも、栽植密度の上昇に伴う DMPPFD の減少傾向が見られたが、一部の樹冠にはこのほかに D1 と D2 の比率の違いによる影響も表面化し、傾向および数値ともに晴天日とは異なった (第4表下段)。

SCLEAS および OLEAS は全葉の瞬時の葉面受光量のデータをその葉が存在するブロックごとに算出するから、DMPPFD 値の比較だけでなく、様々な解析が可能である。以下、紙面の関係から、樹冠形が円柱で、葉群構造が中空の樹冠モデル (第10図D) に限定して、独立樹と密植園 (3.15m  $\times$  3.15m 植え) を比較する。樹冠全体の葉面 PPFD 瞬時分布の毎時の変化を比較すると、晴天の日中は日向部と日陰部が分離するため極めて広い分布が現れ (第12図上)、曇天日は狭い分布になった (第12図下)。晴天日の極めて広い分布は果樹園の光環境、とりわけ、葉面受光強度分布の実測がいかに困難である

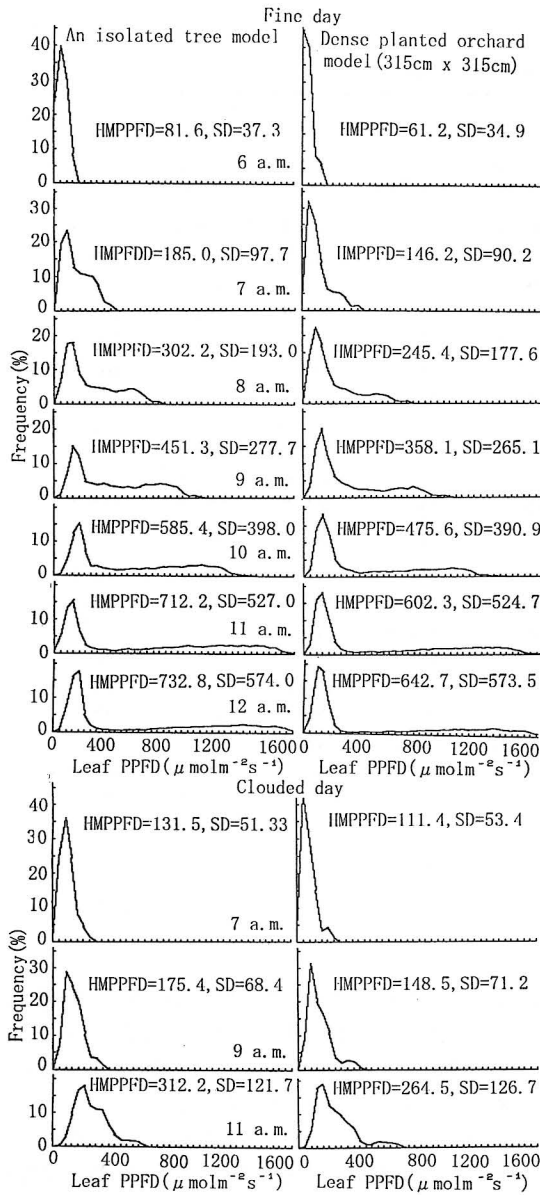


Fig. 12. Diurnal changes in hourly distribution of relative frequency of leaf area in respect to leaf PPFd estimated by OLEAS of an isolated fruit tree (left) and a dense-planted orchard model (3.15m  $\times$  3.15m planted, right) of a fruit tree crown model (empty circular cylinder) on a fine day (upper part, 6 hour times) and a cloudy day (lower part, 3 hour times). HMPPFD and SD indicates hourly mean PPFd on leaf surfaces and its standard deviation, respectively.

かを物語る。独立樹に対する密植園の毎時の葉面 PPFd の平均値 (HMPPFD) の減少割合は、午前 6 時で 24.8% と高く、12 時では 12% であり、太陽高度の低い時間帯における側方からの光強度減衰の影響が大きいことを示す (第 12 図の HMPPFD 値を参照)。太陽直射光のない曇天日ではこの傾向は弱くなった (第 12 図下)。次にグリッドを 1 ブロックの厚さで水平あるいは縦にスライス状にしたときの段別あるいは別列 (東西列および南北列) の HMPPFD 値を比較する (第 13, 14 および 15 図)。いずれの時刻もグリッドの上段ほど HMPPFD 値は大きかったが (第 13 図)、独立樹 (実線) に対する密植園 (点線) の段別 HMPPFD 値の減少割合は太陽高度が低い午前 6 時では 40% 台にもなったのに対して、太陽高度の高い昼間は低下した (第 13 図)。グリッドの東西方向のスライス (xy 列) の HMPPFD の減少割合は (第 14 図)、太陽方位が南に近づくにつれ (昼間になるほど)、南側の列ほど高くなり、たとえば、12 時では 53.6% にもなった (第 14 図)。これは明らかに周辺樹 (特に真南の位置にある周辺樹) による光強度減衰の結果である。この時刻には独立樹の南側に最も強い光が当るから、この減少割合が

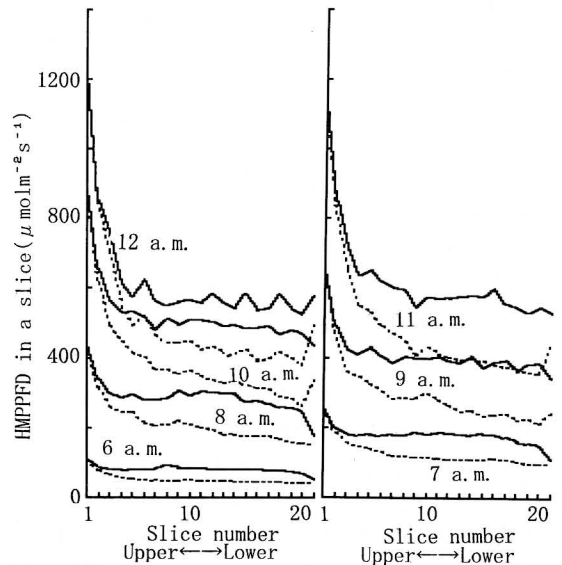


Fig. 13. Comparisons of hourly mean PPFd on leaf surfaces (HMPPFD) within a slice with a width of the block paralleled to xy plane of VG between the dense-planted orchard model (3.15m  $\times$  3.15m planted, dotted line) and the isolated tree (solid lines) of a tree crown model of empty circular cylinder from 6 a.m. to 12 a.m. on a fine day.

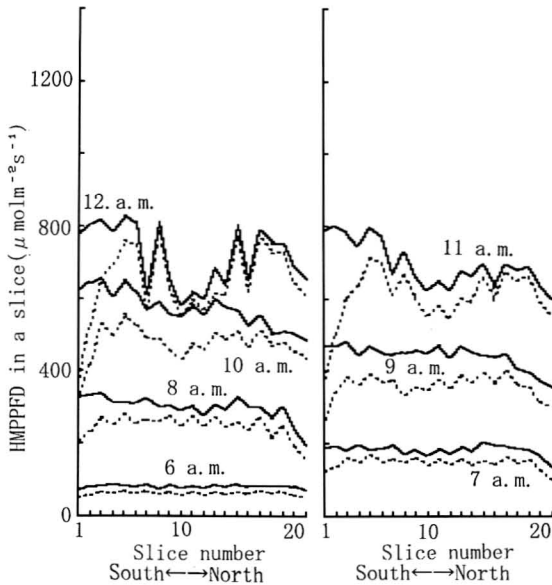


Fig. 14. Comparisons of hourly mean PPFD on leaf surfaces (HMPPFD) within a slice with a width of the block paralleled to  $zx$  plane of VG between the 2 shown in Fig. 13.

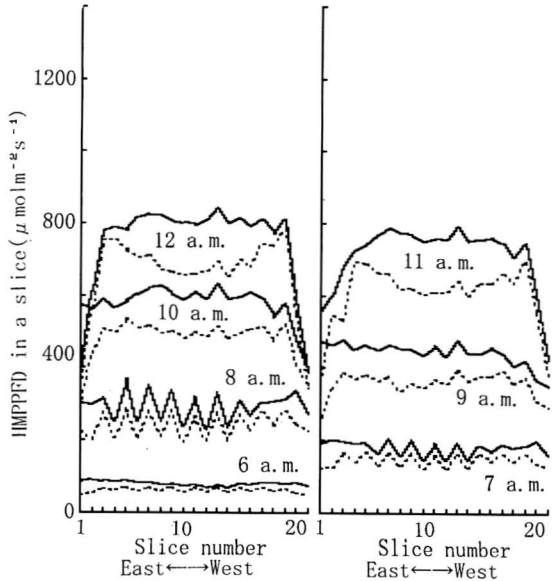


Fig. 15. Comparisons of hourly mean PPFD on leaf surfaces (HMPPFD) within a slice with a width of the block paralleled to  $yz$  plane of VG between the 2 shown in Fig. 13.

50%を越えたものと考えらる。南北方向のスライス ( $yz$  列) の HMPPFD の減少割合は (第15図), 太陽方位が

東に近い早朝ほど東端で高く, 昼間に近づくにつれて中間部の列ほど高くなった (第15図)。第13~15図はスライス (列あるいは段) 当たりの葉面 PPFD の平均値であったが, 樹冠全体の葉面 PPFD の広い分布 (第12図) と同様に, スライス内でも日向葉と日陰葉が混在し, 広い分布を示す。そこで, 円柱 (中空) の樹冠モデルについて, 周辺樹による光強度減衰作用が予想される部位に限定して, 水平または垂直のスライスの中の葉面 PPFD 値分布のプロフィール図 (第16図のディスプレイ画面のカラー写真。15段階の葉面 PPFD を15色で表示) を密植園 (315cm×315cm 植え) と独立樹の間で比較する。12時における最上段には, 周辺樹の光強度減衰作用がほとんど及ばないため, 葉面 PPFD 分布には両者の間にほとんど差が見られなかった (第16図の A と B)。しかし, 11段目 (第16図の C と D), 南から1列目 (第16図の E と F) および東から11列目 (第16図の G と H) のプロフィール図には, 太陽方位が南中のときの, 真南にある周辺樹による光強度減衰が強く生じる部位が明瞭に現れていた。独立樹の上記スライスのプロフィール図 (第16図の C, E および G) の中の南側部分の葉面 PPFD が  $1400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  以上 (白色) の葉が, 密植園では  $200 \sim 300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (青色) あるいはこれ以下に変わった (第16図の D, F および H)。一方, 北側ではこのような変化は少なかった。この時の太陽高度は約  $71^\circ$  で, 太陽方位は南中であるから, 周辺樹とくに真南にある隣接樹による強い光強度減衰が及ぶ範囲は, 樹冠上端よりやや下がった位置より下である。この範囲の南側表層中の日向部葉の多くが日陰部葉に変化したことを示す。一方, 周辺樹による太陽直射光の減衰は, 最上段の葉層とともに, 北側表層中の葉にはこの時刻には生じない ( $G_{cot71^\circ}$  の距離は北側表層に届かない) から, 日向部葉数の減少はわずかであった。密植園には天空光の光強度減衰も生じるから, 暗赤色から水色の中間部 ( $300 \sim 1100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) が青色以下 ( $300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  以下) に変化した葉も一部見られたが (第16図), 天空光自体が弱いことから, 第16図の段階別表示では判りにくい。ほかの時刻のプロフィール図においても上記と同様な傾向が明瞭に現れたが, 結果の詳細は省略する。以上の解析結果は, 周辺樹の枝葉を斜方柱内の積算葉面積指数に取り込む OLEAS の計算アルゴリズムが正常に働いていることを明瞭に示すものである。実際の樹冠を対象とする場合でもこの性能はなんら変わらない。

上記のように, 周辺樹の光強度減衰の影響は時刻によ

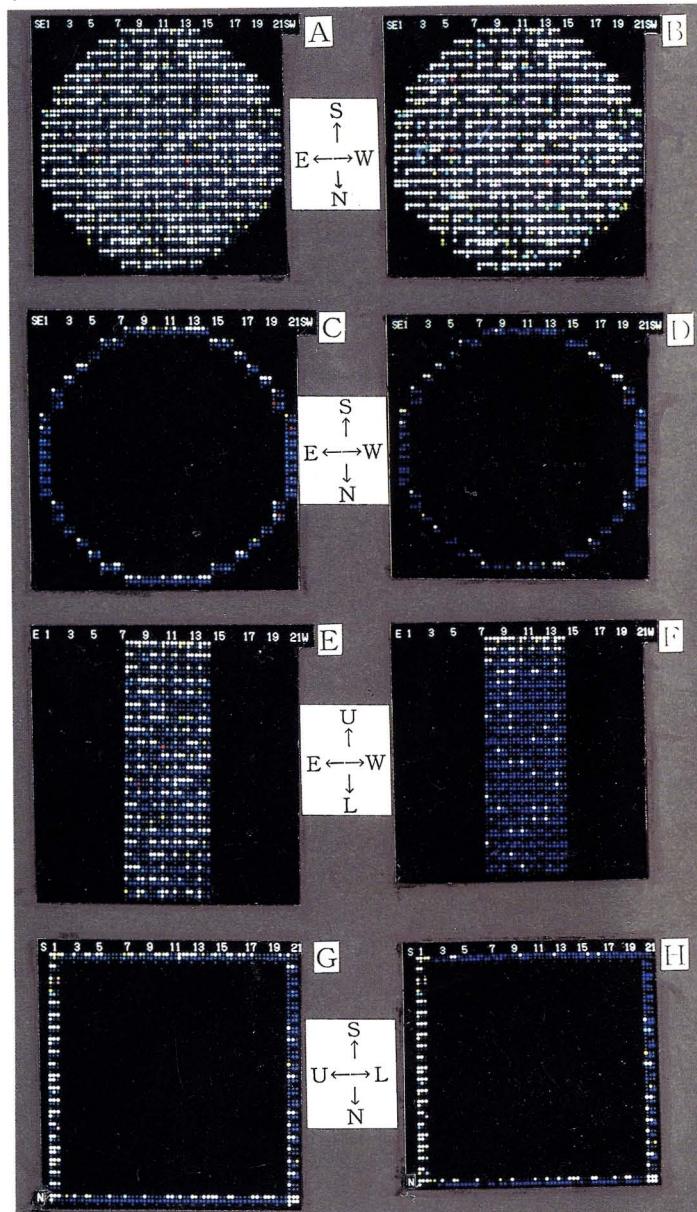


Fig. 16. Comparisons of profile of leaf PPFd distribution within the uppermost slice parallel to xy plane of VG between the isolated tree (A) and the dense-planted orchard model (3.15m  $\times$  3.15m planted, B) of the empty circular cylinder crown model (Fig. 12-D) at 12 a.m. on a fine day, that within the 11-th slice parallel to xy plane between the 2 (C and D), that within the 1-st slice parallel to zx plane between the 2 (E and F), and that within the 11-th slice parallel to yz plane between the 2 (G and H). S, N, E, W, U and L at the arrow tops indicates southern, northern, eastern, western, upper and lower direction, respectively. The levels of leaf PPFd (unit:  $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ): grey (0-1), dark blue (1-2), blue (2-3), dark red (3-4), red (4-5), dark magenta (5-6), magenta (6-7), dark green (7-8), green (8-9), dark cyanic (9-10), cyanic (10-11), dark yellow (11-12), yellow (12-13), dark white (13-14) and white (>14).



りあるいは樹冠内の局部に強く現れたが、1日当たりの平均値である DMPPFD の減少割合はさほど高くならなかった (第4表)。この理由として、①光強度減衰が側方からの光に限られること、②投射光強度が時刻により大きく異なり、早朝ではこの減少割合が高くても光強度が極めて小さいので、1日全体としての減少割合に及ぼす影響は小さいこと、③樹冠の一部分に減少割合が高くても他の部分はさほどでないこと、④球や円錐体の樹冠 (第10図の A, B, C, J, K および L) を配植した密植園においては、側方あるいは斜め上方からの光が入りやすく、この場合の減少割合は極めて低いことなどが考えられる (第4表を参照)。④の傾向は密植園の光環境改善に関連して興味深い。

以上の解析結果から、OLEAS は果樹園光環境の解析機能を有するものといえる。小さな仮想グリッド内に葉数を配置するという簡単な操作だけで、任意の栽植様式を有する果樹園の光環境を解析できるシステムが初めて登場したことは、多様な樹冠形や葉群構造を持つ樹冠と栽植方式を組み合わせ、これらの果樹園光環境を極めて容易に解析できることを意味し、果樹園の設計、樹形や仕立て方の選抜にとって光環境解析の方面から貢献できるものと思われる。

なお、複数の樹形・葉群構造の樹を一定の規則で混植する場合、 $B1(x, y, z)$ ,  $B2(x, y, z)$ …のように、葉量の空間分布データである3次元配列変数を数個準備し、斜方柱光の先端部の位置を用いた計算アルゴリズム (3.の3) および4)) の中に、これらの混植規則を結び付けて、この先端部の属する周辺樹がどの配列変数をもつかを識別する工夫を施せばよい。また、1樹を立方体の仮想グリッドに包む方法をとる OLEAS では、縦長の樹冠に対して、樹間距離 ( $D_1$ ) をあまりにも小さくとると、樹高を1辺とする立方体グリッドの中に隣接樹が入り込むので、その使用は無理である。数個体を仮想グリッドに包んだときの葉群分布データを一つの配列変数  $B(x, y, z)$  で表現するなどの工夫が必要であろう。さらに傾斜地果樹園に対する本方法の拡張も必要である。今後は、多様な樹冠を用いた OLEAS による果樹園の光環境解析を行い、光環境改善をもたらす樹冠形、葉群構造および栽植様式の探索を行うとともに、上記の改善点について検討していきたい。植被が小さい割には個葉面積が大きく、葉がまばらな離散分布型植被の群落には OLEAS は適しなく、伊藤 (1995) の方法によらざるを得ないものと考えられる。

## 摘 要

1. 筆者は以前に葉量の水平方向の分布が不均一になる果樹 (独立樹) の光環境の解析方法として、立方体グリッドと斜方柱状平行光線の交錯を用いたコンピュータモデルを作成した (山本, 1988)。この交錯により、離散分布型植被の光環境解析を門司・佐伯理論に基づいて扱うことが可能であると考えたものである。本報では上記モデルのパラメータを修正し、その使用方法の幾つかの改良を行い、これを独立樹冠光環境システム (SCLEAS) と名づけた。また、セイヨウナシやカキを用いて、SCLEAS の検証実験を行ったところ、良好な結果を得た。

2. SCLEAS を任意の栽植様式をもつ平地上の果樹園にも適用できるよう工夫し、果樹園光環境解析システム (OLEAS) を作成した。これは同一の外部形態と内部構造をもつ果樹個体を、任意の栽植様式のもとで繰り返し配置した果樹園モデルをその解析対象とするものである。

3. SCLEAS を OLEAS にまで拡張するときの必要条件は、光環境の推定対象樹と隣接樹との距離、すなわち、樹間距離 (株間,  $D_1$ ) と樹列間距離 (畝間,  $D_2$ ) の両者を推定樹グリッドのブロック1辺長の整数倍の長さにするこゝである。これにより、推定樹における斜方柱と仮想グリッドとの交錯より生じるデータ群、すなわち、この両者により切りとられた多面体の体積のブロック体積に占める割合 ( $V_r$  値) とブロック位置のデータを、その外側で繰り返し使用することができる。また、連立不等式による光強度減衰をもたらす周辺樹の位置を見いだすための計算アルゴリズムを考案した。

4.  $H_o \geq 45^\circ$  の場合、光強度減衰の作用を及ぼす周辺樹は多くても隣接8樹に限られ、 $A_z$  の4領域に分けると多くても3樹になる。斜方柱光先端がブロック1辺長の刻みでz軸の正方向 (下方) に伸びた任意の場所が、推定対象樹の中、隣接3樹のいずれかの中あるいはこれ以外の場所にあるかの識別を行うための計算アルゴリズムを、その場所の3軸上の区間番号、栽植距離 ( $D_1$  および  $D_2$ ) およびグリッド1辺長 ( $G$ ) の値を用いて考案した。斜方柱光の先端部が隣接樹にあるときは、その樹を包むグリッドを推定樹グリッドに完全に重なるまで平行移動することにより、当初のブロックと同じ位置に相当する推定樹グリッド内のブロックの持つ葉数  $B(x, y, z)$  を参照できる。この操作により、そこまでの斜方

柱内の積算葉面積指数(L')を計算でき、光強度減衰を計算できた。

5.  $H_o < 45^\circ$  の場合、推定樹グリッドから水平方向に、周辺樹による光遮断や光の減衰作用が起きることがなく、かつ、Gの整数倍になる距離をとって、斜方柱光の入射口とした。このことにより、一度計算したVr値群とブロック位置のデータを、この先端部がGの距離だけ進むたびに再使用できた。斜方柱光の先端が所属する圃地内の区画を判別するための計算アルゴリズムを考案した。そして、4.と同様な平行移動の結果、移動先が推定樹グリッドの中にあれば、光強度減衰を計算し、外部に相当したときは、上記の区画内の樹と樹の間の空間(樹間空間あるいは樹列間空間)に存在し、光強度減衰を受けることがないと見なした。

6. OLEASはSCLEASの計算原理の全てを実質的に継承するので、後者の検証結果に見られた有効性を保持するものと考えた。数種類の樹冠モデルと8段階の栽植様式を組み合わせ、OLEASによる解析試験を行ったところ、密植圃(315cm×315cm植え)の1日の葉面PPFD平均値(DMPPFD)は独立樹に対して最高17%ほど減少した。しかし、樹冠の部位や時刻によってはその減少割合は数十%にもなった。葉数や樹高を同じにしても樹冠形によりDMPPFD値のレベルは異なり、樹冠容積の大きいものは葉密度の低下によりDMPPFDは大きくなった。樹冠容積の小さい円錐体や球を用いた果樹園モデルでは栽植密度の増大によるDMPPFDの減少はわずかだった。

### 引用文献

- Duncan, W. G., R. S. Loomis, W. A. Williams and R. Hanau (1967) A model for simulating photosynthesis in plant communities. *Hilgardia*. **38**: 181-205.
- Geller, G. N. and P. S. Nobel (1984) Cactus ribs: Influence on PAR interception and CO<sub>2</sub> uptake. *Photosynthetica*. **18**: 482-494.
- Geller, G. N. and P. S. Nobel (1986) Branching pattern of columnar cacti: Influences on PAR interception and CO<sub>2</sub> uptake. *Amer. J. Bot.* **73**: 1193-1200.
- 堀江 武 (1981) 気象と作物の光合成、蒸散そして生長に関するシステム生態学的研究。農技研報。A. **28**: 1-181.
- Horie, T. and T. Udagawa (1971) Canopy photosynthesis of sunflower plants - Its measurements and modeling - . *Bull. Natl. Inst. Agric. Sci. Ser. A*. **18**: 1-58.
- Isobe, S (1969) Theory of the light distribution and photosynthesis in canopies of randomly dispersed foliage area. *Bull. Natl. Inst. Agric. Sci. Ser. A*. **16**: 1-25.
- 伊藤大雄 (1984) 桑枝条の開張度と受光態勢に関する理論的解析。日蚕雑。 **53**: 14-20.
- 伊藤大雄 (1995) 桑个体群の受光態勢と光合成に関する生産生態学的研究。蚕糸昆虫研報。 **13**: 1-142.
- Kuroiwa, S (1978) Radiation of leaves during photosynthesis in plant stands with different foliage angles. In *JIBP synthesis 19, Ecophysiology of photosynthetic productivity* (ed. by M. Monsi and T. Saeki) pp. 113-119, Univ. Tokyo Press.
- 黒岩澄雄・門司正三 (1963a) 植物群落における光要因と光合成の理論的解析(2) 吸光係数と光合成の日変化。農業気象。 **19**: 15-21.
- 黒岩澄雄・門司正三 (1963b) 植物群落における光要因と光合成の理論的解析(1) 葉層構造と直射光、散光および自然光との関係。農業気象。 **18**: 143-151.
- Monsi, M. and Saeki, T (1953) Über den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und Seine Bedeutung für die Stoffproduktion. *Jap. J. Bot.* **14**: 22-52.
- Oikawa, T (1977a) Light regime in relation to plant population geometry. II. Light penetration in a square-planted population. *Bot. Mag. Tokyo*. **90**: 11-22.
- Oikawa, T (1977b) Light regime in relation to plant population geometry. III. Ecological implications of a square-planted population from the viewpoint of utilization efficiency of solar energy. *Bot. Mag. Tokyo*. **90**: 301-311.
- Oikawa, T. and T. Saeki (1977) Light regime in relation to plant population geometry. I. A monte carlo simulation of light microclimates within a random distribution foliage. *Bot. Mag. Tokyo*. **90**: 1-10.
- Ross, Iu, K. and T. Nilson (1966) 群落内におけるバイオマスの垂直分布。「光合成と多収獲」(内嶋善兵衛訳)、農林水産技術会議(1967)編, pp. 89-101.
- 田中純生 (1969) モンテカルロ法によるタバコ群落内の葉面受光量第1報。1株の直射光受光量の計算。生物環境調節。 **7**: 12-16.
- Verhagen, A. M. W., J. H. Wilson and E. J. Britten (1963) Plant production in relation to foliage illumination. *Ann. Bot.*, N. S. **27**: 627.
- Wit, C. T. de (1965) Photosynthesis of leaf canopies. *Agric. Res. Report*. **663**: 1-56. PUDOC Wageningen.
- 山本隆儀 (1988) 果樹における葉面放射の樹冠内分布推定シミュレーションモデル。山形大学紀要(農学)。 **10**: 583-612.
- 山本隆儀 (1998) ほほ同一の葉量、容積および占有土地面積を有する独立樹の樹冠内光環境に及ぼす樹冠形と葉群構造の影響に関するコンピュータ解析。山形大学紀要(農学)。 **13**: 13-27.
- 山本隆儀・島 良七 (1991) 果樹の樹形・葉群構造の季節

- 的变化解析システム, 山形大学紀要(農学), **11**: 343-373.
- 山本隆儀・伊藤博祐(1996)広角レンズを用いた直角2側面写真による密植わい性リンゴ樹の樹形・葉群構造の計測. 園学雑, **64**: 729-739.
- 山本隆儀・上田仁悦・小泉弘樹・西沢滝太(1990)落葉果樹の樹冠内放射の減衰係数とその推定パラメータ. 山形大学紀要(農学), **11**: 155-176.
- 山本隆儀・山口恵理(1989)果樹の樹形・葉群構造の簡易解析システム——二側面写真画像を用いた新システムの開発——. 山形大学紀要(農学), **10**: 869-901.
- Yim, Y. J., H. Ogawa and T. Kira(1969)Light interception by stem in plant communities. Jap. J. Ecol. **19**: 233-238.

付 録

Table I. Discriminants using 2 parameters ( $R_{WE}$  and  $R_{SN}$ ) to judge a direction (Azmax) from which scattering lights from sky most drench to a block among 8 directions. Here,  $I_{SW}$ ,  $I_{SE}$ ,  $I_{S}$  and  $I_{N}$  is total scattering light in a block from western, eastern, southern and northern side, respectively, and  $I_{STOTAL}$  is a sum of the  $I_{SS}$  from 4 sides.  $R_{WE} = (I_{SW} - I_{SE}) / I_{STOTAL}$ ,  $R_{SN} = (I_{S} - I_{N}) / I_{STOTAL}$ .

Discriminants	Azmax
$ R_{WE}  < 0.2$ and $ R_{SN}  < 0.2$	Incidence of uniformity
$R_{WE} > 0.2$ and $R_{SN} > 0.2$	Southwest
$R_{WE} > 0.2$ and $R_{SN} < -0.2$	Northwest
$R_{WE} > 0.2$ and $ R_{SN}  < 0.2$	West
$R_{WE} < -0.2$ and $ R_{SN}  < 0.2$	East
$R_{WE} < -0.2$ and $R_{SN} > 0.2$	Southeast
$R_{WE} < -0.2$ and $R_{SN} < -0.2$	Northeast
$ R_{WE}  < 0.2$ and $R_{SN} < -0.2$	North
$ R_{WE}  < 0.2$ and $R_{SN} > 0.2$	South

Table II. Fifteen grades (A-O) of inequality of incidence of scattering light in a block. Each grade is made from a combination of range of  $|R_{WE}|$  with that of  $|R_{SN}|$ .

		Range of $ R_{SN} $				
		0	0.2	0.4	0.6	0.8
Range of $ R_{WE} $	0	A	B	C	D	E
	0.2	B	F	G	H	I
	0.4	C	G	J	K	L
	0.6	D	H	K	M	N
	0.8	E	I	L	N	O
1.0						

Table III. Multiple regressions of modification coefficients (Kq) by Azmax, leaf inclination angle ( $\alpha$ ) and leaf azimuth angle ( $\beta$ ) corresponding to the 15 grades of inequality of incidence of scattering lights into a block (A-O, see Table II).

Grades	Formula	R <sup>z</sup>	Significance by F-test
A	$Kq = 0.5\cos\alpha + 0.5$	1.0000	
B	$Kq = 0.5074\cos\alpha + 0.1443\cos(\beta - Azmax) + 0.479$	0.9785	P < 0.001
C	$Kq = 0.5044\cos\alpha + 0.2355\cos(\beta - Azmax) + 0.483$	0.9656	P < 0.001
D	$Kq = 0.5025\cos\alpha + 0.3329\cos(\beta - Azmax) + 0.484$	0.9563	P < 0.001
E	$Kq = 0.5059\cos\alpha + 0.4213\cos(\beta - Azmax) + 0.481$	0.9516	P < 0.001
F	$Kq = 0.4962\cos\alpha + 0.2146\cos(\beta - Azmax) + 0.491$	0.9673	P < 0.001
G	$Kq = 0.4990\cos\alpha + 0.2657\cos(\beta - Azmax) + 0.488$	0.9441	P < 0.001
H	$Kq = 0.4395\cos\alpha + 0.3529\cos(\beta - Azmax) + 0.556$	0.8404	P < 0.001
I	$Kq = 0.4976\cos\alpha + 0.3601\cos(\beta - Azmax) + 0.493$	0.8743	P < 0.001
J	$Kq = 0.4801\cos\alpha + 0.3141\cos(\beta - Azmax) + 0.493$	0.8990	P < 0.001
K	$Kq = 0.5020\cos\alpha + 0.3930\cos(\beta - Azmax) + 0.486$	0.9379	P < 0.001
L	$Kq = 0.4331\cos\alpha + 0.5015\cos(\beta - Azmax) + 0.483$	0.8984	P < 0.001
M	$Kq = 0.5064\cos\alpha + 0.4711\cos(\beta - Azmax) + 0.481$	0.9414	P < 0.001
N	$Kq = 0.5125\cos\alpha + 0.5294\cos(\beta - Azmax) + 0.475$	0.9338	P < 0.001
O	$Kq = 0.5014\cos\alpha + 0.5766\cos(\beta - Azmax) + 0.486$	0.9340	P < 0.001

<sup>z</sup> Coefficient of correlation of multiple regression.