

## 桑園の受光態勢を評価するプログラムの開発

誌名	日本蠶絲學雜誌
ISSN	00372455
著者	伊藤, 大雄
巻/号	56巻6号
掲載ページ	p. 474-482
発行年月	1987年12月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター  
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council  
Secretariat



## 桑園の受光態勢を評価するプログラムの開発

伊藤 大雄

茨城県つくば市・農林水産省蚕糸試験場(〒305)  
(1987年4月11日 受領)

DAIYU ITO : Development of a program for the estimation of light-interception in mulberry fields

In order to clarify the ideal time of cutting, planting pattern, plant shape, etc. of mulberry from the viewpoint of light-interception, the author developed MORUS-LICS by improving his former program. MORUS-LICS is the simulation program to know the light-intercepting condition and CO<sub>2</sub> uptake of a model mulberry population through the method of numerical experiment: i.e., after defining each shoot (circular truncated cone) and leaf (elliptic plane) of the model mathematically based on the measured data, it generates many beams (straight line) and solves simultaneous equations with the shoots and leaves. Planting density, row direction, ground inclination, etc. can be chosen as the initial conditions. Although there existed a slight difference between simulated results and measured data concerning the rate of penetrated light, matter production and productive structure of the primary growth stage in some cases, they were fairly in good agreement so that MORUS-LICS could be regarded as useful. (Sericultural Experiment Station, Tsukuba, Ibaraki 305)

望ましい桑の伐採時期、栽植型式、樹型等を受光態勢の観点から究明するため、既往のプログラムを改良して MORUS-LICS を開発した。MORUS-LICS は、計測データに基いてモデル桑樹群落の各枝(円錐台)・各葉(楕円形)を数式化する一方、多数の入射光線(直線)を設定し、両者の連立方程式を解いて数値実験的に受光状態と CO<sub>2</sub> 同化量を求めるシミュレーションプログラムであり、栽植密度、畦の方位や植栽面の傾斜等を初期条件として自由に指定できる。MORUS-LICS による計算結果は、透過光の割合、物質生産量や生育初期の生産構造に関して実測値と若干異なる場合があったが、計算結果と実測値は概ね一致しプログラムの有用性が認められた。

植物群落の受光態勢の研究に際し、タバコ(田中, 1969)、サボテン(Nobel, 1980; Geller and Nobel, 1986)や仮想の植物群落(Oikawa, 1977 a, b)など葉の空間配置が極めて不均一な事例に対しては、門司・佐伯の理論式(Monsi und Saeki, 1953)に代わってシミュレーションによる解析が行われてきた。著者も、望ましい桑の伐採時期、栽植型式、樹型等を受光態勢の観点から究明するために、シミュレーションによる理論的研究に着手した(伊藤, 1984)。今回開発した MORUS-LICS (Light Intercepting Condition Simulator) は、既報のプログラム

を大幅に改良したもので、計測データを利用して現実性の高いモデル桑樹群落を作成し、受光状態の予測精度を高めるとともに、光合成や呼吸に関する諸式を組み込むことにより、CO<sub>2</sub> 同化量の算出も可能となった。本報では MORUS-LICS の概要を述べた後、生産構造、受光状態や物質生産量について、計算結果と実測値を比較・検討した。

本論に先立ち、プログラムの一部を作成された群馬県蚕業試験場角田浩文技師ならびに当場榎山玲子氏、取りまとめに際して御助言下さった農業環境技術研究所佐藤光政博士ならびに小泉博博士に厚く御礼申し上げる。

## MORUS-LICS の概要

## (1) 特徴と機能

MORUS-LICS は FORTRAN 77 言語で記述され、フローチャート (第1図) に示したように、モデル桑樹群落の各枝 (円錐台)・各葉 (楕円形) を数式化した後、多数の入射光線 (直線) を設定し、両者の連立方程式を解いて受光状態と CO<sub>2</sub> 同化量を数値実験的に求めるモンテカルロ・シミュレーションプログラムである。そのため、葉群の均一分布を前提とする門司・佐伯の理論式では解析困難な栽植密度 (普通植・密植)、畦の型式 (等高線畦・斜面畦) や方向をはじめ、生育時期、植栽面の傾斜等を初期条件として自由に指定することができる。さらに、群落の生育段階としてモデル桑樹の最長枝条長も 50cm から 240cm (密植は 50~200 cm) まで変更でき、気象データの交換と緯度の変更により任意の地域での CO<sub>2</sub> 同化量の算出も可能である。なお出力データとしては、モデル桑樹の生産構造、時刻別・層別の光遮断率や受光の効率\*、時刻別・層別・光合成速度別の葉面積分布、さらに周日あるいは時刻別・層別の CO<sub>2</sub> 同化量等が挙げられる。

## (2) モデル桑樹群落の作成

MORUS-LICS のモデル桑樹群落は、全枝葉を数式で表現する必要上、同一のモデル桑樹が畦間 2 m (密植では 1 m。以下同じ)、株間 0.6 m (0.5 m) で整然と配列されていると仮定した。またモデル桑樹は、半径 10cm (7cm) の円形株面の周囲から上部半径 2.5mm の円錐台型枝条が 30本 (15本) 展開し、その葉はすべて楕円形の平面で、長径の延長線長に直線状の葉柄を有すると仮定した。ある株を原点にとり、畦、畦間、鉛直方向をそれぞれ X, Y, Z 軸に定めれば、上記の仮定から、一般にその第 i 枝表面は円錐を表わす 2 次曲面  $\Gamma_s(i)$  (①式) で、また第 j 葉表面は平面  $\pi(j)$  (②式) 上にあり、かつ楕円柱を表わす 2 次曲面  $\Gamma_L(j)$  (③式) の内側にある点の集合として表わされる。

$$\Gamma_s(i) : S_1(i)x^2 + S_2(i)y^2 + S_3(i)z^2 + S_4(i)xy + S_5(i)yz + S_6(i)zx + S_7(i)x + S_8(i)y + S_9(i)z + S_{10}(i) = 0 \quad \text{……………①}$$

$$\pi(j) : L_1(j)x + L_2(j)y + L_3(j)z + L_4(j) = 0 \quad \text{……………②}$$

$$\Gamma_L(j) : L_5(j)x^2 + L_6(j)y^2 + L_7(j)z^2 + L_8(j)xy + L_9(j)yz + L_{10}(j)zx + L_{11}(j)x + L_{12}(j)y + L_{13}(j)z + L_{14}(j) = 0 \quad \text{……………③}$$

ここで、 $\Gamma_s(i)$  の係数は第 i 枝の方位角、傾斜角、枝条長および基部半径から、 $\pi(j)$  と  $\Gamma_L(j)$  の係数は第 j 葉の葉面積、葉長葉幅比、着生位置、葉柄長、傾斜角および方位角から計算され (計算式省略)、計算に必要な諸値は主として前報 (伊藤, 1986) に基き決定されるが、普通植桑園を例にとると概略は以下の通りである。

すなわち、まず第 1 表 (iii) や (vi) を用いて入力された最長枝条長から現在の日時 d (伐採日より起算) を求めるとともに、全枝を 3, 6, 9, 12 本に区分し、それぞれタイプ 1~4 として分類する。そして d や枝条タイプに応じ、枝条方位角は (i) の確率密度関数に従うように、また枝条傾斜角は (ii) の値を中心とする標準偏差 9°~27° の正規分布に従うように決定する。さらに各枝の枝条長を節間長 (後述) の総和から、基部半径を便宜的に次式から決定する。

$$\text{基部半径 (cm)} = 0.25 + 0.0025 \times \text{枝条長 (cm)} \quad \text{……………④}$$

次に各枝に着生する葉の諸形質は、枝条タイプ毎に下位葉から次の要領で決定する。すなわち、まず (iii) に葉位 m を代入して開葉日時 (伐採日起算) を求め、d からこの値を引いて葉齢を知る。続いて枝条タイプ、葉位、葉齢をもとに (iv), (v), (vi) からそれぞれ葉面積、葉長葉幅比および節間長を決定する。ここで下位の節間長の総和と枝条の方位角、傾斜角から、着生位置が計算できる。さらに葉柄長は葉長の 29% とし、葉面傾斜角は前報第 2 表から、方位角は葉序が 2/5 または 1/2 となるように順次決定する。なお、前報第 1 表をもとに、既に落葉している葉は計算対象から除外する。

さて、傾斜角  $\beta$  の斜面畦を例にとると、モデル桑樹群落全体は第 2 図 D に示すように株を中心とし、幅  $IPL \cos \beta$ 、奥行  $IRL$  なる側壁と、地面ならびに地面に平行な上壁とで囲まれる六面体 (以後単位群落と呼ぶ) の繰り返しとして把握できる。したがって少なくとも 1 個の単位群落内の枝条配置を完全に数式化することが必要であるが、この点については、モデル桑樹に六面体をかぶせ、側壁の外に出る枝条を対向壁の該当する位置に平行移動することで解決できる (第 2 図 A~C)。すなわち、①式

\* 光遮断率 = 上層からの透過光割合 - 下層への透過光割合  
受光の効率 = 光遮断率 / 葉面積指数

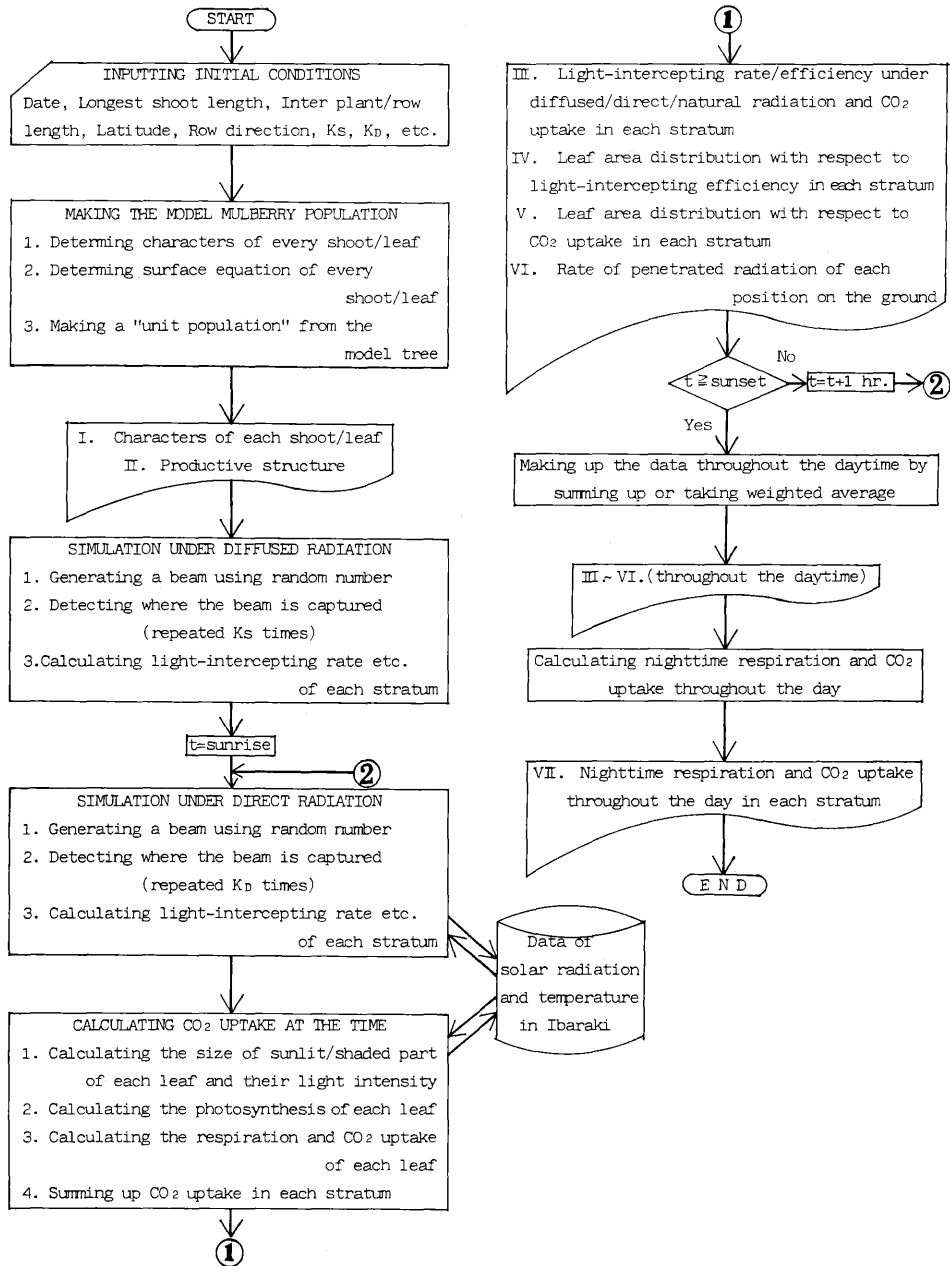


Fig. 1. General flow chart of MORUS-LICS.

Ks, Kd : Number of generated diffused and direct beam

t : Time of the day

Table 1. Equations concerning light-interception in a normally planted mulberry field  
(Quoted or derived from Ito, 1986)

Criterion variable(y)	Relation with other variables	
(i) Probability density of shoot azimuth angle	$y = \begin{cases} (9.50 \times 10^{-5})\alpha + (6.84 \times 10^{-3}) & (d \leq 50) \\ (2.17 \times 10^{-4})\alpha + (1.35 \times 10^{-3}) & (d > 50) \end{cases}$	
(ii) Mean shoot inclination angle (90° when erected)	$y = \begin{cases} -0.0122d^2 + 1.769d + 11.02 & (TY=1 \ d \leq 76) \\ 75 & (TY=1 \ d > 76) \\ -0.0085d^2 + 1.205d + 13.46 & (TY=2 \ d \leq 76) \\ 56 & (TY=2 \ d > 76) \\ 0.00045d^3 - 0.0816d^2 + 3.881d - 24.19 & (TY=3) \\ 0.00039d^3 - 0.0690d^2 + 3.157d - 7.62 & (TY=4) \end{cases}$	
(iii) Days after pruning when unfolded	$y = \begin{cases} 1.35m + 11.0 & (TY=1 \ m \leq 8) \\ -\log(1/m - 0.0097)/0.0507 - 21.833 & (TY=1 \ m \geq 9) \\ 1.66m + 11.0 & (TY=2 \ m \leq 7) \\ -\log(1/m - 0.0144)/0.0595 - 12.083 & (TY=2 \ m \geq 8) \\ 1.71m + 11.0 & (TY=3 \ m \leq 7) \\ -\log(1/m - 0.0331)/0.0751 - 6.398 & (TY=3 \ m \geq 8) \\ 2.00m + 11.0 & (TY=4 \ m \leq 6) \\ -\log(1/m - 0.0670)/0.1034 + 0.699 & (TY=4 \ m \geq 7) \end{cases}$	
(iv) Adult leaf area (cm <sup>2</sup> )	$y = y_1 y_2 / 100$ $y_1 = \begin{cases} 11.74m - 7.0 & (TY=1 \ m \leq 21) \\ 239.4 & (TY=1 \ 21 \leq m \leq 42) \\ -2.81m + 357.3 & (TY=1 \ m \geq 42) \\ 10.12m - 11.9 & (TY=2 \ m \leq 19) \\ 185.9 & (TY=2 \ 20 \leq m \leq 45) \\ -7.29m + 519.3 & (TY=2 \ m \geq 46) \\ 7.57m + 1.34 & (TY=3, 4 \ m \leq 17) \\ 133.1 & (TY=3, 4 \ m \geq 18) \end{cases}$ $y_2 = \begin{cases} 97.20 / \{1 + \text{EXP}(-1.123a + 4.093)\} & (d \leq 22 \ a \leq 11) \\ 98.14 / \{1 + \text{EXP}(-0.678a + 4.557)\} & (d > 22 \ a \leq 15) \\ 100 & (\text{other cases}) \end{cases}$	
(v) Ratio of leaf width/length	$y = y_1 y_2 / 100$ $y_1 = \begin{cases} -16.93m + 138.26 & (SY=1 \ m \leq 3) \\ 86.98 & (TY=1 \ m \geq 4) \\ -2.58m + 103.98 & (TY=2 \ m \leq 7) \\ 85.41 & (TY=2 \ m \geq 8) \\ -1.03m + 95.68 & (TY=3, 4 \ m \leq 15) \\ 80.00 & (TY=3, 4 \ m \geq 16) \end{cases}$ $y_2 = \begin{cases} -0.428a^2 + 8.343a + 59.37 & (a \leq 10) \\ 100 & (a \geq 10) \end{cases}$	
(vi) Internode length (cm)	$y = y_1 y_2 / 100$ $y_1 = \begin{cases} 0.59m - 0.543 & (TY=1 \ m \leq 9) \\ -0.051m - 5.254 & (TY=1 \ m \leq 9) \\ 2.243 & (TY=1 \ m \geq 59) \\ 0.626m - 0.830 & (TY=2 \ m \leq 8) \\ -0.041m + 4.510 & (TY=2 \ 8 \leq m \leq 61) \\ 1.986 & (TY=2 \ m \geq 61) \\ 0.438m + 0.280 & (TY=3, 4 \ m \leq 10) \\ -0.173m + 6.412 & (TY=3, 4 \ m \geq 10) \end{cases}$ $y_2 = \begin{cases} 10.718a + 14.256 & (a \leq 8) \\ 100 & (a \geq 8) \end{cases}$	

Independent variable:  $\alpha$ : Shoot azimuth angle (inter plant direction=0°) d: Days after pruning

TY: Shoot type m: Leaf order from the base a: Leaf age (days)

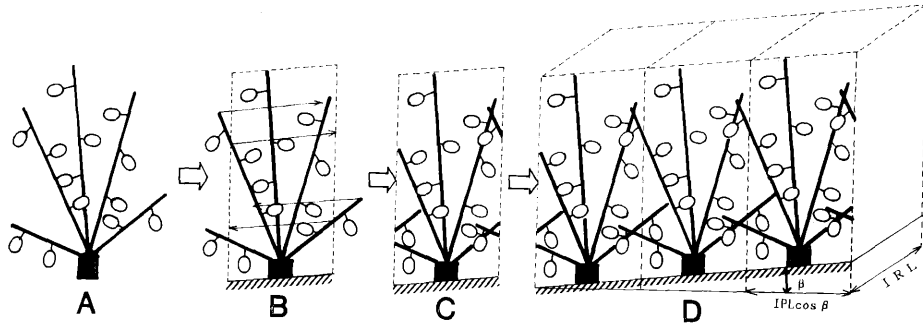


Fig. 2. The way of grasping spatial shoot/leaf distribution of the model population from a model tree.

$\beta$ ; ground inclination angle IPL; inter plant length IRL; inter row length

あるいは②, ③式で記述されたモデル桑樹の全枝葉のうち, 側壁外へ展開する枝は係数の一部を変更して所要の平行移動を行い, 対向壁より侵入する枝として新たに追加するとともに, 側壁内に位置する葉も係数の一部を変更して側壁内に平行移動する。この操作によって単位群落内の枝葉が隣接株のものも含めて完全に数式化できる。

(3) 受光状態の解明

受光状態解明のため, まず散光あるいは直達光に相当する光線(直線)を1本設定するが, その一般式は次の通りである。

$$(x-x_0)/A=(y-y_0)/B=(z-z_0)/C \quad \dots\dots\dots ⑤$$

ここで,  $(x_0, y_0, z_0)$  は単位群落上壁上の任意の一点で, 光線設定のたびに一様乱数を用いて決定する。また,  $(A, B, C)$  は光線の方向余弦で, 散光の場合は $0^\circ \sim 360^\circ$ の一様乱数を用いて方位角  $\varphi_s$  を, また分布が三角関数  $y=\sin 2\theta_s$  に従う  $0^\circ \sim 90^\circ$  の乱数を用いて入射角  $\theta_s$  を定めた後,

$$A=\cos \theta_s \cos \varphi_s \quad \dots\dots\dots ⑥$$

$$B=\cos \theta_s \sin \varphi_s \quad \dots\dots\dots ⑦$$

$$C=-\sin \theta_s \quad \dots\dots\dots ⑧$$

として決定する。一方直達光の方向余弦は同一時刻内では一定であり, 時刻(T)ごとに次式で決定する。

$$A=\cos h \cos \{15^\circ \times (12-T)+\gamma\} \quad \dots\dots\dots ⑥'$$

$$B=\cos h \sin \{15^\circ \times (12-T)+\gamma\} \quad \dots\dots\dots ⑦'$$

$$C=-\sin h \quad \dots\dots\dots ⑧'$$

ここで $15^\circ \times (12-T)+\gamma$  は直達光の方位角。 $\gamma$  は畦の方向を示し, 南北方向とのズレを時計回りで表示する。また,  $h$  は直達光の入射角, すなわち太陽高

度で, 当該月日の太陽赤緯  $\varphi_{SUN}$  と緯度  $\sigma$  から次式で計算される。

$$\sin h = \sin \varphi_{SUN} \sin \sigma + \cos \varphi_{SUN} \cos \sigma \cos \{15^\circ \times (12-T)\} \quad \dots\dots\dots ⑨$$

次に, ⑤式で設定された光線に対し, ①式との連立方程式を解き, 実数解の有無で第  $i$  枝との交点の有無を, また②式との連立方程式を解いて解を③式左辺に代入し, 値の正負で第  $j$  葉との交点の有無を判定する。そして光線は, 最も上部で交点を持つ枝葉に捕捉されるのであるから, 群落上部に位置する枝葉から順に判定を行い, 原則として最初に交点を持つ枝葉に捕捉されると判断する。また, 光線がどの枝葉とも交点を持たぬまま単位群落側壁に達する時は, 光線が対向壁の該当する位置に平行移動されるように⑤式の  $(x_0, y_0, z_0)$  を変更した後, 判定作業を再開する。そして交点が得られぬ限り, 光線が地面に達するまでこの操作を繰り返す。

光線の設定と捕捉部位の判定を一定回数繰り返した後, 光線の延捕捉回数を枝葉別あるいは層別に求めると, 直ちに受光状態が明らかになる。例えばある時刻に直達光を  $K_D$  回投射したところ, 第  $n$  層の枝と葉が光線をそれぞれ  $kns$  回,  $knl$  回捕捉したとすれば, 同層の直達光遮断率は枝で  $kns/K_D$ , 葉で  $knl/K_D$ , 層全体で  $(kns+knl)/K_D$  である。また, MORUS-LICS 周辺の磁気ディスクファイルには, 茨城県つくば市の日射データと同県土浦市の気温データが収められているので, 前者から当該日時の水平面散光強度  $I_{s0}$ , 直達光強度  $I_{D0}$  を検索し, これを重みとして両光の結果を加重平均すれば, 自然光下の受光状態も計算できる。

Table 2. Equations concerning photosynthesis of mulberry

Criterion variable	Relation with other variables	Reference
(i) Max. apperant photo-synthetic rate at 25°C (mgCO <sub>2</sub> /dm <sup>2</sup> /hr.)	$P_{max_{25}} = \begin{cases} 1.658a - 5.67 & (DU \leq \text{Jul. 7 } a \leq 20) \\ 0.0183a^2 - 1.823a + 56.632 & (DU \leq \text{Jul. 7 } 21 \leq a \leq 50) \\ -0.080a + 15.30 & (DU \leq \text{Jul. 7 } a \geq 51) \\ 1.819a - 3.67 & (\text{Jul. 8} \leq DU \leq \text{Aug. 7 } a \leq 20) \\ 0.0207a^2 - 2.098a + 66.388 & (\text{Jul. 8} \leq DU \leq \text{Aug. 7 } 21 \leq a \leq 50) \\ -0.152a + 20.80 & (\text{Jul. 8} \leq DU \leq \text{Aug. 7 } a \geq 51) \\ 1.282a - 3.37 & (\text{Aug. 8} \leq DU \leq \text{Sep. 2 } a \leq 20) \\ 0.0229a^2 - 2.110a + 55.337 & (\text{Aug. 8} \leq DU \leq \text{Sep. 2 } 21 \leq a \leq 50) \\ -0.074a + 10.80 & (\text{Aug. 8} \leq DU \leq \text{Sep. 2 } a \geq 51) \\ 0.435a - 0.40 & (DU \geq \text{Sep. 3 } a \leq 20) \\ -0.092a + 10.13 & (DU \geq \text{Sep. 3 } a \geq 21) \end{cases}$	Murakami 1978
(ii) Max. photosynthetic rate (mgCO <sub>2</sub> /dm <sup>2</sup> /hr.)	$P_{max} = P_{max_{25}}(28.60 + 4.80t - 0.082t^2)/97.35$	Murakami and Takeda 1973a
(iii) Photosynthesis (mgCO <sub>2</sub> /hr.)	$P = S \cdot P_{max} \{I / (0.074 + 0.0084I)\} \times 10^{-4}$	Murakami and Takeda 1973b
(iv) Respiratory rate at 30°C (mgCO <sub>2</sub> /dm <sup>2</sup> /hr.)	$RES_{30} = \begin{cases} -0.578a + 8.60 & (DU \leq \text{Jul. 17 } a \leq 10) \\ -0.13a + 4.20 & (DU \leq \text{Jul. 17 } 11 \leq a \leq 20) \\ 1.60 & (DU \leq \text{Jul. 17 } a \geq 21) \\ -0.58a + 8.70 & (DU \geq \text{Jul. 18 } a \leq 10) \\ -0.075a + 3.65 & (DU \geq \text{Jul. 18 } 11 \leq a \leq 30) \\ 0.020a + 0.80 & (DU \geq \text{Jul. 18 } a \geq 31) \end{cases}$	Murakami 1983
(v) Respiratory rate (mgCO <sub>2</sub> /dm <sup>2</sup> /hr.)	$RES = RES_{30} \{18.45 \text{EXP}(0.054t)\} / 93.23$	Murakami and Takeda 1973a

Independent variable : DU : Date of unfolding a : Leaf age (days) P<sub>max<sub>25</sub></sub> : Maximum photosynthetic rate at 25°C P<sub>max</sub> : Maximum photosynthetic rate RES<sub>30</sub> : Respiratory rate at 30°C t : Temperature (°C) I : Light intensity (Klux) S : Leaf area (cm<sup>2</sup>)

(4) CO<sub>2</sub> 同化量の算出

散光を K<sub>s</sub> 回, またある時刻に直達光を K<sub>D</sub> 回 設定・投射したところ, 第 j 葉が散光を k<sub>s</sub>(j) 回, 直達光を k<sub>D</sub>(j) 回捕したとする。この時第 j 葉の CO<sub>2</sub> 同化量は, 一たん葉を日向部分と日陰部分に分けて別々に光合成量を求め, 両者の和から呼吸量を引いて得ることとしたが, 手順の概略は以下の通りである。

初めに, 当該時刻における第 j 葉上の散光強度 I<sub>s</sub>(j), 直達光強度 I<sub>D</sub>(j), 日向葉面積 S<sub>D</sub>(j) を次式より計算する。

$$I_s(j) = I_{s0} \times IPL \times IRL \times k_s(j) / (S(j) \times K_s) \dots\dots\dots ⑩$$

$$I_D(j) = I_{D0} \times \sin \xi / \sin h \dots\dots\dots ⑪$$

$$S_D(j) = IPL \times IRL \times k_D(j) \times \sin h / (K_D \times \sin \xi) \dots\dots\dots ⑫$$

ここで, S(j) は第 j 葉の葉面積。また ξ は直達光の葉面への入射角度で, 平面 π(j) (⑫式) の係数

と直達光の方向余弦 (⑥'~⑧'式) を用いて次のように計算される。

$$\sin \xi = L_1(j)A + L_2(j)B + L_3(j)C \quad \dots\dots\dots \textcircled{9}$$

これらの諸値を用い、日向部分は面積が  $S_D(j)$  で光強度が  $I_D(j) + I_S(j)$ 、日陰部分は面積が  $S(j) - S_D(j)$  で光強度が  $I_S(j)$  と求められる。なお光強度 ( $ly/min$ ) は観測 (未発表) に基き、71.4 を乗じて照度 ( $klux$ ) に換算した。

次に、入力された月日から第  $j$  葉の葉齢を差し引いて開葉日を知り、開葉日と葉齢をもとに第2表(i)で  $25^\circ C$  での見かけの最大光合成速度 ( $P_{max25'}$ ) を求める。この値に  $25^\circ C$  での呼吸速度 (後述) を加えて真の最大光合成速度 ( $P_{max25}$ ) とした後、(ii) で気温による温度補正を行う。なお気温は周辺ファイルから検索する。温度補正した最大光合成速度 ( $P_{max}$ ) を、先に求めた日向・日陰別の面積、照度とともに (iii) に代入すると両部分の光合成量が得られる。

最後に第  $j$  葉の呼吸量は、まず開葉日と葉齢をもとに (iv) で  $30^\circ C$  での速度 ( $RES_{30}$ ) を求めた後 (v) で温度補正し、これに面積  $S(j)$  を乗じて得る。ただし MORUS-LICS では実際の呼吸量は計算値の 55~70% (村上, 1983) とした。

MORUS-LICS は以上の要領で受光状態と  $CO_2$  同化量を日出から日没まで1時間毎に計算した後、各時刻の結果を加重平均または合計して日中を通じての結果を得る。さらに夜間の呼吸量を日中と同じ手法で求め、周日同化量を計算した後、作業を終了する。

### 結果と考察

第3図に、MORUS-LICS が作成・計算したモデル桑樹群落の生産構造と午前11時における直達光の受光状態を、当時の桑園での実測例\*と比較した。なお、計算に当たっては実測地の実情に合わせて緯度を  $+36^\circ$ 、畦方向を  $S30^\circ E$ 、植栽面の傾斜を  $0^\circ$  とし、最長枝条長も実測例とはほぼ等しい値を指定した。またモデル桑樹の株の高さは 30 cm (密植は 20 cm) とした。その結果、計算されたモデル桑樹群落の葉面積指数は実測値とよく一致し、誤差は最高 10% 程度にとどまったが、枝条容積は生育が進むに

つれて実測値を下回り、C、F ではそれぞれ 19%、27% の過小評価となった。一般に枝条は伸長停止後も少しづつ肥大を続け、基部半径も次第に増加すると思われるが、基部半径を決定する④式は経時的要因を全く考慮していないことが、生育後期における過小評価の主な原因であろう。しかし計算によると枝条に捕捉される入射光は高々 2% 程度にすぎなかったため、枝条容積が 20~30% 過小評価されても、群落全体の受光状態や物質生産量への影響は無視できると考えられる。次に直達光の受光状態や枝葉の分布型式を比較したところ、生育初期の A や D では最下層の枝葉が極端に少なく計算されていた。MORUS-LICS のモデル桑樹は、再発芽直後に整芽した株での計測データに基いて作成されるため、生育初期における株面付近の枝葉が過少評価されたものと思われる。しかし、その他の点では計算結果は実測例とよく一致した。

次に、第3図の条件下における地面への直達光の透過状況を、透過光割合とともに第4図に示した。計算結果は実測例と同じ傾向を示し、生育初期には畦間を中心にながりの直達光が地面に達したが、その量は経時的に減少した。しかし、普通植桑園 (A~C) や生育初期の密植桑園 (D) では、透過光割合が実測値を上回る傾向があった。モデル桑樹では葉面の傾斜角・方位角や枝条の空間配置が数式や乱数によって決定されるため、これらが屈光性等によって巧みに調整される圃場桑に比べて受光能力が劣ることが主な原因と考えられる。また A や D の場合は、最下層に葉が乏しい (第3図) ことも原因の一つに挙げられよう。

次に普通植あるいは密植の夏切桑園において、6月30日から8月31日まで最長枝条長が第3表の如く推移するものとして、半月ごとに  $CO_2$  の周日同化量を計算し、収量生長速度 (CGR) を推定した。計算に当たってはいずれの場合も北緯  $35^\circ$ 、南北畦、植栽面の傾斜  $0^\circ$  とし、得られた  $CO_2$  の周日同化量 (非同化器官の維持呼吸は無視されている) は、一たん  $180/264$  を乗じてグルコースに換算し、さらに変換効率 0.75 (堀江, 1983) を乗じて CGR の推定値とした。結果は第3表に示した通りであり、CGR の最高値として普通植桑園では8月15日に  $12.9 g/m^2 \cdot day$ 、密植桑園では7月31日に  $10.0 g/m^2 \cdot day$  が得られた。既往の文献によれば、夏切り

\* 実測例は、日本蚕糸学会第55回および第56回学術講演会で発表した。



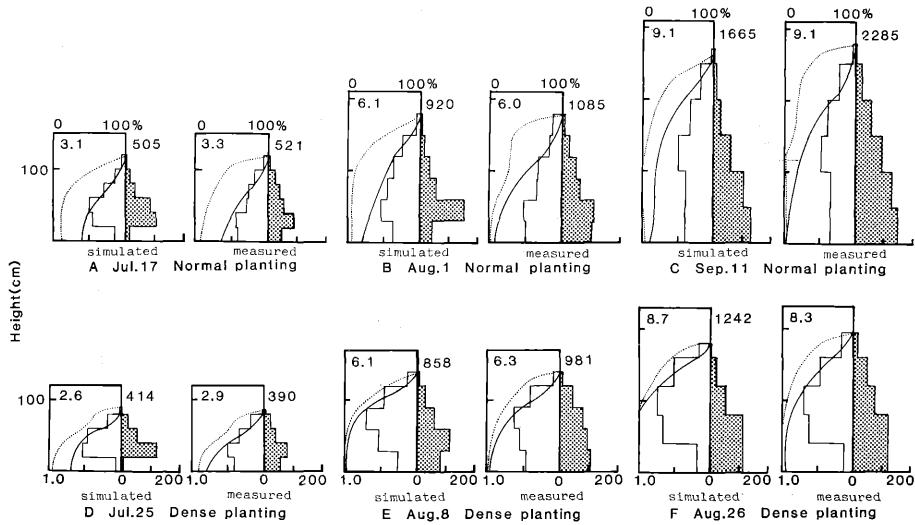


Fig. 3. Productive structure and light-intercepting condition at 11 AM.

— penetrated light (%)      □ leaf area ( $m^2/m^2 \cdot 10cm$ )  
 ..... light-intercepting efficiency (%)      ▨ shoot volume ( $cm^3/m^2 \cdot 10cm$ )  
 Numerals in the figure indicate leaf area index and shoot volume ( $cm^3/m^2$ ) respectively.

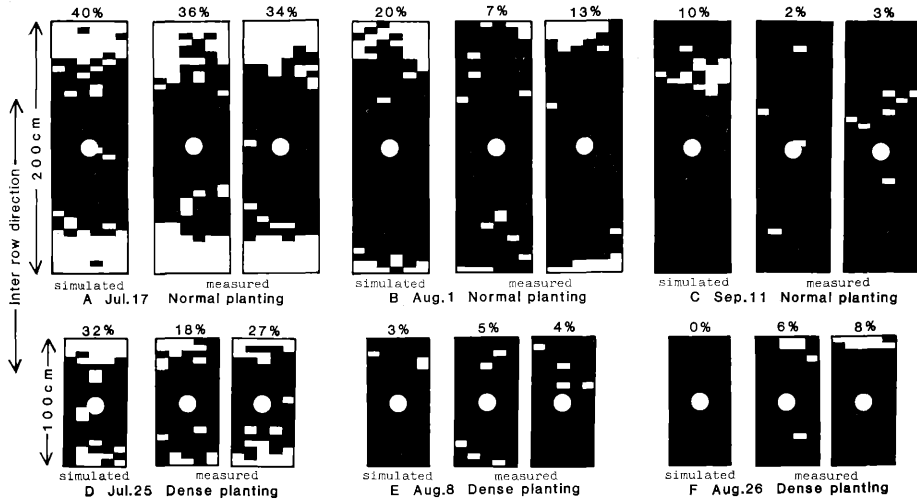


Fig. 4. Penetration of direct radiation onto the ground at 11 AM.

○ stump □ sunlit ■ shaded  
 Numerals indicate the rate of penetrated direct radiation.

Table 3. Estimated CGR in the mulberry field after summer pruning by MORUS-LICS

Date	CGR			
	Normal planting		Dense planting	
	cm	g/m <sup>2</sup> day	cm	g/m <sup>2</sup> day
Jun. 30	( 40)	2.0	( 30)	0.5
Jul. 15	( 85)	6.4	( 70)	5.3
Jul. 31	(130)	12.0	(110)	10.0
Aug. 15	(175)	12.9	(150)	9.6
Aug. 31	(220)	10.0	(190)	8.6

( ) indicates the longest shoot length of the model tree used in the calculation

Table 4. Measured maximum CGR in the mulberry field after summer pruning

Reference	Maximum CGR(Period)
	g/m <sup>2</sup> day
Kobayashi et al. 1976	10.7 (Jul. 16~Jul. 27)
Kobayashi and Kikuchi 1984	18 (Aug. 12~Aug. 26)
Shikata et al. 1984	13.5 (Jul. 29~Aug. 25)
Minami et al. 1984	11.1 (Jul. 8~Aug. 19)
Minami et al. 1985	18.8 (Jul. 8~Jul. 29)
Mean	14.4

後の CGR の最高値は 11 g から 19 g にわたり、いずれも 7~8 月に得られている (第 4 表) ので、MORUS-LICS が算出した CO<sub>2</sub> 同化量は、密植桑園ではやや少ないが概ね妥当な水準であると見なすことができよう。なお、過少評価の原因としては、光合成速度としてポットに栽植された植付当年の桑で得られた値をそのまま計算に利用したこと等

が考えられるが、密植桑園で特に低く計算される理由は必ずしも明らかでない。

以上のように MORUS-LICS は生育初期におけるモデル桑樹の生産構造に少々問題があるほか、透過光割合や物質生産量において、計算値と実測値が若干異なる場合もあったが、両者は概ね一致した。したがって上記の欠点に留意すれば、MORUS-LICS を実行して受光態勢と物質生産を論ずることが可能であると判断された。次報以降は、桑園における受光態勢の経時変化、畦や植栽面の方位・傾斜が受光態勢に及ぼす影響、さらに気象条件と CO<sub>2</sub> 同化量との関係等を、普通植・密植の両面で論ずる予定である。

## 文 献

- GELLER, G. N. and NOBEL, P. S. (1986) : Amer. J. Bot. **73**, 1193-1200.
- 堀江 武 (1983) : 農及園, **58**, 1110-1114.
- 伊藤大雄 (1984) : 日蚕雑, **53**, 14-20.
- 伊藤大雄 (1986) : 蚕試報, **30**, 323-340.
- 小林昭三・菊池宏司 (1984) : 蚕試彙報, (120), 39-49.
- 小林昭三・佐藤光政・市橋隆寿・小野松治・大山勝夫 (1976) : 蚕試報, **26**, 363-384.
- 南 政邦・岩田 益・内田 信 (1984) : 蚕試彙報, (120), 77-90.
- 南 政邦・岩田 益・内田 信 (1985) : 蚕試彙報, (125), 67-75.
- MONSI, M. und SAEKI, T. (1953) : Jap. J. Bot., **14**, 22-52.
- 村上 毅 (1978) : 蚕試報, **28**, 353-368.
- 村上 毅 (1983) : 蚕試報, **29**, 1-164.
- 村上 毅・竹田友四郎 (1973a) : 日蚕雑, **42**, 157-163.
- 村上 毅・竹田友四郎 (1973b) : 日蚕雑, **42**, 417-424.
- NOBEL, P. S. (1980) : Oecologia, **45**, 160-166.
- OTKAWA, T. (1977a) : Bot. Mag. Tokyo, **90**, 11-22.
- OTKAWA, T. (1977b) : Bot. Mag. Tokyo, **90**, 301-311.
- 四方栄市・直井利雄・村上泰臣・中川 泉 (1984) : 蚕試彙報, (120) : 51-64.
- 田中純生 (1969) : 生物環境調節, **7**, 12-16.