

## 樹冠情報の長期予測を目的とした果樹の樹形構築解析システム (CACOAS) の開発

山本 隆儀・宮田 裕美・野口 マキ・奥山 定治  
山形大学農学部生物生産学科農業生産学講座  
(平成15年10月1日受理)

Development of a Canopy Constructing and Analyzing System  
for Long-Term Estimation of Crown Information  
of Fruit Trees (CACOAS)

Takanori YAMAMOTO, Hiromi MIYATA, Maki NOGUCHI and Sadaharu OKUYAMA  
Section of Agricultural Production, Department of Bioproduction,  
Faculty of Agriculture, Yamagata University,  
Tsuruoka, 997-8555, Japan  
(Received October 1, 2003)

### Summary

In order to collect information of fruit tree crowns concerning improvement of light environment, lowering of tree height and mechanization of orchard work, a system by personal computer (CACOAS) was developed to construct and analyze a tree crown throughout long term. Processing and calculation in CACOAS consisted of 11 steps. Namely, input of parameters, selection of configuration of frame branches, selection of pruning methods, estimation of shoot variables and calculation of shoot coordinates, drawing of tree and crown forms, analysis of tree crown, processing of thickening of all branches, processing of pruning, drawing of tree forms after pruning, output of information concerning pruning and age renewal of all branches. This cycle was repeated by last age of tree. Using data from CACOAS, the other system to analyze orchard light environment (OLEAS) enabled analysis of the light environment. Many array variables were prepared whose element was branch number, i.e., the producing order from the beginning. Various calculation techniques were devised by referring to branch age and branch number of the parent branch, and used in the program. Multiple regression estimation method was mainly used in the estimation of shoot variables. If necessary, the Monte Carlo simulation method was combined with it. These parameters were measured mainly by a stereophotogrammetry. Space geometry was used in the calculation of spatial coordinate of shoot. Performance tests of CACOAS on typical five types of tree shape of apple 'Fuji' were carried out for 20 years. Another performance tests were done on the two types of tree shape by changing configuration of their frame branches or their pruning factors for 20 years. As the result, the program worked as was expected, and brought good results for us. CACOAS outputted much crown information, much pruning information, many tree form images and crown form ones. Remarkable effects of the difference in the configurations or the conditions on their tree forms, crown information and light environments were found by CACOAS. This program was written in a visual BASIC, and the all line number was about 4600. The estimation time spent for 20 years of the one tree shape was slightly about 45 minutes by a usual personal computer.

**Key words:** simulation system by a computer, tree form, tree crown form, training and pruning, apple

## 緒 言

整枝剪定に対する栽培者の関心は非常に強い。毎年不可避の作業であるというのがその理由のひとつである。しかし、整枝剪定の基本に従っても、実際には種々雑多な要因にふりまわされ、思い通りにはいかない。1年前に個々の樹や枝に施した剪定の中味を憶えている人は珍しく、また、一度失敗するとやり直しがきかないから、一通り修得するのに相当の年月と労苦を経る。今日的急務になった後継者育成や人に優しい果樹農業への転換にとってこれは大きな問題であろう。ところで、整枝剪定がむずかしい本当の理由は、その対象が高度の複雑性をもつことではないかと思われる。すなわち、巨大作物、不定形、季節変化、経年変化、多数の器官、計測困難、予測困難などである。これらは、人間の判断の不得意とする3次元、4次元の世界である。

環境保全と持続的生産、輸入自由化と価格破壊、人に優しい農業、後継者問題などの我国果樹農業の今日的課題に応えるため、低投入、超省力、高品質、安定的な果実生産があげられている（農林水産省、1993）。光環境改善、低樹高化、機械化対応などはこのための有力な方策の一つであるが、いずれも樹形に密接に関係する。とはいえ、樹形の改良試験には、①長時間や広大な面積を要する、②高所密集部位や多数の枝葉を対象にする、③葉量分布や樹容積などの調査には膨大な労力を要する、④光環境の調査法が未確立で実測が難しい、などの共通の悩みがある。

最近、植物器官において齢が代わっても相似の分岐様式、発出間隔、形状などを繰り返すこと（フラクタル性）を特殊関数表現し、これを利用した自然植物形の時空シミュレーションモデル（L-system）の応用が紹介されている（Prusinkiewicz, 1998）。筆者らもL-systemを用いて樹形構築と樹冠解析のためのシステムを作成し、樹形開発のための道具や剪定講習のための支援システムとして利用できないかと考えた。しかしながら毎年大量の枝を剪去する栽培果樹は人工的な形をもつため、この方面でのL-systemの有効性に疑問を抱いた。本研究においてはL-systemを利用せず、独自の方法を考案した。すなわち、前年生枝の形状・姿勢から新梢の形状・姿勢を重回帰推定し、コンピュータ内に新梢を次々に発生させる。次に、枝の肥大と剪定のプロセスを加え、最後に枝齢を1年繰り上げる。この操作を最終樹齢まで繰り返すことで、長期間にわたる樹形変化を短時間に予測でき

ないかと考えた。また、枝葉の4次元変化をコンピュータが解析することで、短時間に多くの樹冠情報を入力できないかと考えた。さらに、骨格枝の配置を自由に選ぶことで生じる様々な樹形において、樹高、樹幅、葉面積指数（以下、LAI）の目標値を変えたときの樹冠情報や剪定内容を出力させ、これらを樹形開発や整枝剪定法の検討に役立てないかと考えた。

上記の目的でシステム開発に取り組んだ結果、ほぼ満足できるものに到達できたと考え、これを果樹の樹形構築解析システム（Canopy Constructing and Analyzing System of fruit trees, 以下、CACOAS）と名づけた。本報告はCACOASの中の基本的な計算部分およびリンゴ‘ふじ’を対象にした関連パラメータとCACOASの性能試験結果を記したものである。

## 材料および方法

### 1. CACOASの概要

#### 1) システム全体の特長

本報告を新システムCACOASの公表の場としたため、本章（材料および方法）が相当膨らんだことをことわっておきたい。CACOASによる処理・計算は、パラメータの入力から枝齢の繰上げまでの合計11のステップからなった（第1図）。すなわち、パラメータ類の入力（第1ステップ）、骨格枝（主幹から垂主枝）の配置の選択（第2ステップ）、制約条件や剪定条件の選択（第3ステップ）、重回帰推定法による新梢の形状・姿勢の推定とその空間座標の計算（第4ステップ）、剪定前の樹形図および樹冠形図の作図（第5ステップ）、仮想グリッドによる葉量と枝量の3次元分布の計算、およびこれらを用いた樹冠解析（第6ステップ）、個々の枝の年肥大量推定値を用いた全枝の肥大処理（第7ステップ）、年次別目標葉面積指数、樹幅・樹高の制約条件および剪定条件に対応した剪定処理（第8ステップ）、剪定後の樹形の作図（第9ステップ）、剪定の中味とその結果の集計および出力（第10ステップ）、および枝齢の繰り上げ（第11ステップ）であった。2年目からは第4ステップに戻り、最終樹齢まで、このサイクルを繰り返した。なお、別システムの果樹園光環境解析システム（以下、OLEAS、山本、1999）にデータを引き渡し、光環境の解析を可能にした。通常、上記のサイクルを数十年にわたり繰り返したので、初年度から数えた新梢の発生順番（通し番号）を枝番号とし、枝番号を添字とする多くの配列変数を準備した。また、枝齢や母枝の枝番号を参照した多くの計

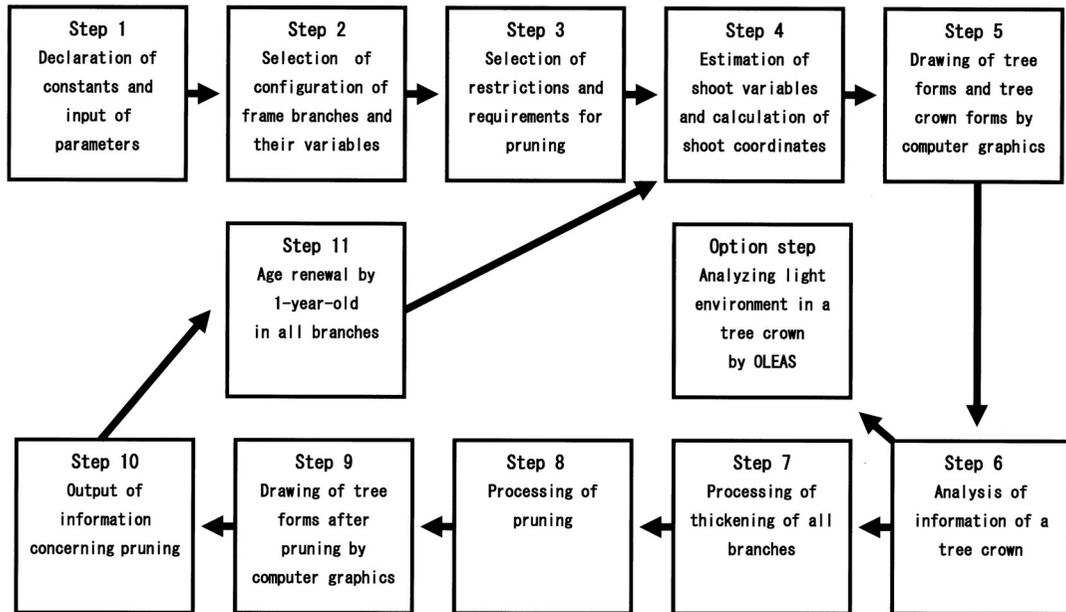


Fig 1. The eleven steps in CACOAS and the flow of the processings. OLEAS is the abbreviation of the Orchard Light Environment Analyzing System (YAMAMOTO, 1999).

算手法を考案し、プログラム中に用いた。なお、理解しやすいように、以下の各ステップの記述は順序不同であった。また、各ステップにおけるアルゴリズムや計算手法の詳細は次節に記した。

## 2) 新梢の形状・姿勢の推定と新梢の空間座標の計算ステップ (第4ステップ)

新梢の姿勢を決定する要素として、前年生枝基部から新梢発生源までの枝に沿った距離 (以下、発生距離またはDIS)、分岐角度 (BA)、長さ (L)、曲率半径 (R、枝を円弧とみなす) および枝序角度 (RA) を取り上げた (第2図)。なお、枝序角度は前年生枝断面における新梢発出方向の回転角度のことで、この断面上の地軸方向から反時計回りに測ったものであった。この合計5個の数値を用いて、空間解析幾何学により、新梢中心軸数点 (本システムでは、新梢中心軸7点) の空間座標、傾斜角度 (IA) および方位角度 (DA) を計算した。これらに、前年生枝当りの新梢総数、発生順番、太さ (基部と先端部の直径) も加え、以下、総称して新梢特性値 (あるいは、単に特性値) と記した。

ほとんどの特性値の推定は重回帰推定法あるいはこれにモンテカルロシミュレーションを加味した方法を用い

た。よって本システムを利用する場合、重回帰式偏回帰係数などのパラメータを事前に入手しておかねばならない。重回帰推定の手順は次のようにした。記憶された前年生枝の全特性値により、その前年生枝上の新梢総数を最初に推定し、次に、今推定したばかりの新梢総数も加えて、最基部 (1番目) の新梢の発生距離を推定した。以後、同様に、推定済みの変数を加えながら、その新梢にかかわる未推定の変数を推定し、順次記憶した。最後に上記の特性値を用いて、新梢中心軸上7点の空間座標、傾斜角度および方位角度を計算した。これらの推定及び計算をその前年生枝上の残りの全ての新梢について繰り返した。さらに、この計算過程を残りの全ての前年生枝について繰り返した。

重回帰式偏回帰係数が有意であっても、推定式の寄与率が低いほど説明変数による影響力は小さい。この場合には推定値の分布が狭くなり、自然下の偶然的要因が加わった分布とはかけ離れる。そこで、自然分布に近づける便法として、モンテカルロシミュレーション法 (Mize・Cox, 1969) を加味した方法を考案した。その計算原理の要点は以下のとおりであった (第3図)。確率密度 (P) を縦軸にとり、横軸中心に重回帰推定値 (V) を置き、

重回帰分析結果からの残差標準誤差を標準偏差に置き換えた正規分布曲線を考えた（第3図a）。次に、この曲線の横軸はそのままにして、縦軸を確率密度の積算値（CP,  $0 < CP < 1$ ）に変更した曲線を作成した（第3図b）。発生した疑似乱数（RN,  $0 < RN < 1$ ）をこの縦軸に取り、水平に伸ばして曲線と交差した点から下した垂線が横軸と交差した点の座標値を最終推定値とした。この方法により、説明変数のみでは決められない偶然誤差（E）が加わった変動を生み出し、擬似的な意味で自然分布に近づくことができると考えた。ただし、重回帰推定値と残

差標準誤差との間に密接な量的関係があれば正確さを欠く。残差標準誤差を初期入力した後で、上記の計算を自動的に行うためのサブルーチンプログラムを作成した。このプログラムの計算手法については次節に記した。

前年生枝の全特性値、ならびに新梢の基部点の空間座標、分岐角度、新梢長、曲率半径および枝序角度を用いて新梢中心軸7点の空間座標を計算する方法を考案した。ただし、この計算過程は複雑で、その説明が長くなるので次節に記した。傾斜角度は新梢中心軸7点のうち基部点（第1点）と新梢弧の中央点（第4点）とを結ぶ直線が水平面となす角度を、方位角度はこの直線が南北軸となす角度（南中から東回りに計る）を計算したものである。

上記は新梢特性値の推定・計算の手順を概略的に示したものであったが、個々の樹種・品種の特長や重回帰分

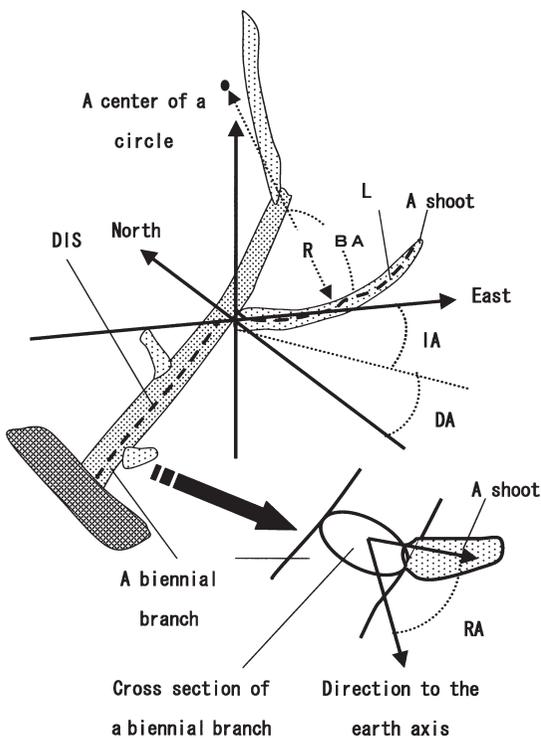


Fig.2. A schematic representation of a shoot geometry. DIS, L, R, IA, DA, BA and RA denotes a distance of a shoot base from the base of the parent branch (a biennial one), the shoot length, the radius of curvature, the inclination angle, the direction angle measured from the south in the east direction, the branching angle and the rotation angle of the shoot measured from the earth axis by counter-clockwise direction on a cross section of the biennial branch, respectively.

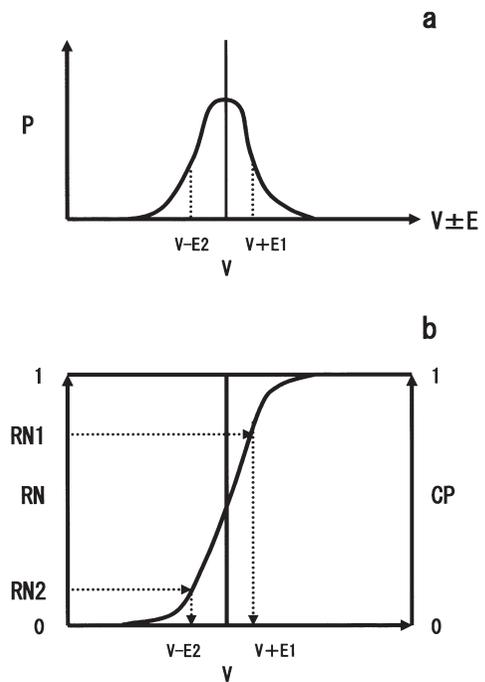


Fig.3. A schema of a combination of Monte Carlo simulation with multiple regression method (MR). A normal distribution curve used a residual standard error from MR as the standard deviation. P : Probability density, CP : Cumulative probability density, RN\* : A random number, V : An estimated value of a variable by MR, E\* : An estimated error.

析結果の良否に対応し、推定手順は一部変更されることもあった。たとえば、リンゴ‘ふじ’における推定手順(結果を参照)は上記のものに少し工夫を凝らした。

### 3) 剪定前の樹形・樹冠形作図ステップ(第5ステップ)

南、東および真上からの平行投影法あるいは透視図法(鳥瞰図など)による樹形図および樹冠形図をパソコン画面上に描き、また、必要に応じ画像保存した。これらには枝中心軸の空間座標データ、枝の直径データ、新梢長と着葉数を関係づけるパラメータおよびコンピュータグラフィックス命令を用いた。また、作図の視角度も自由に選択できるようにした。詳細な作図アルゴリズムについては次節に記した。

### 4) 樹冠解析ステップ(第6ステップ)

任意の大きさの網をもつグリッド(以下、仮想グリッド, virtual grid)を樹にかぶせ、グリッド内部の立方体ブロック(以下、ブロック)に含まれる葉や枝の数を計算した(第4図)。次に、このデータを用いて樹のサイズ、容積、LAI、作業空間およびその他の枝や葉に関連する多くの樹冠情報を出力した。すなわち、葉数配列変数(BLN(i)、ただし、iはブロックの通し番号)、樹高、南北樹幅、東西樹幅、最低樹冠下高さ、樹冠実容積、葉層容積、外部無効容積、内部無効容積、全無効容積、葉存在ブロック数、はげあがり程度、樹冠占有面積、樹冠占有面積当り葉面積指数(LA1c)、制限面積当り葉面積指数(LA1a)、

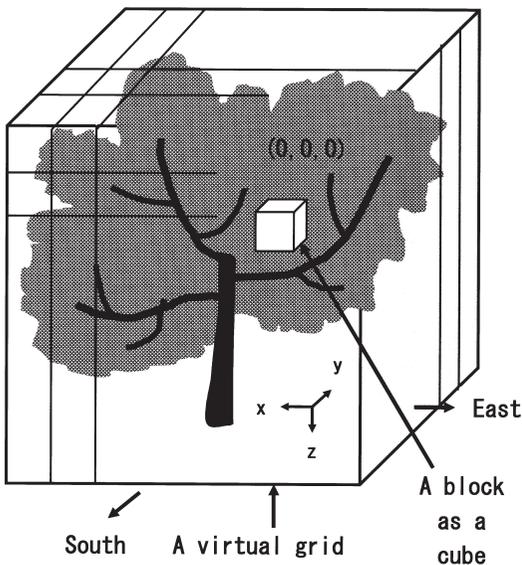


Fig. 4. A schematic representation of a virtual grid and an internal block as a cube.

平均葉密度とその標準偏差、平均樹冠下高さ、樹冠下空間容積、樹冠外周部空間容積、作業空間容積、新梢総数、発育枝総数、短枝総数、新梢平均傾斜角度とその標準偏差、新梢分岐角度とその標準偏差および平均新梢長とその標準偏差であった。これらの計算手法については次節に記した。

### 5) 枝の肥大処理ステップ(第7ステップ)

毎年、全ての枝の年肥大量を推定した。なお、枝に着生した1年若い枝を子枝、子枝を着生した枝を母枝と記すこととし、以後、この「母枝~子枝」の関係はいずれの枝齢の枝にも適用した。母枝および子枝の特性値の多くを用いて子枝の直径を推定する重回帰式を作成した。この式により、説明変数の1つである枝齢を1年高くすることによる直径の増分を推定計算し、その枝の年肥大量とした。よって本システムの使用には、上記の重回帰式偏回帰係数を事前に入手しておかねばならない。

### 6) 剪定ステップ(第8ステップ)

高品質多収の果実生産のためには、結果量、葉量および受光量を適正に確保せねばならない。LAI調節はこのために極めて重要である。夏季剪定によらずにLAIを調節するには、前年の剪定を加減するしかないが、この加減の目安については必ずしも明らかでない。CACOASは、各年次における制限面積当り目標LAIを基準に、剪定ステップに入る前に、(1)式により残存すべき新梢総長を計算した。

今年残存すべき新梢総長 = 去年の剪定後に残存した新梢総長 × 来年の制限面積当り目標LAI / 今年実現した制限面積当りLAI

(1)

剪定ステップでは、残存する新梢総長を絶えず計算しながら、これが(1)式の残存すべき新梢総長に到達したならば直ちにその年の剪定処理を終了した。上記の方法は、来年の制限面積当り目標LAIを実現するために、去年の剪定後に残存した新梢総長と今年実現した制限面積当りLAIの間の量的関係(おおよその比例関係)を利用したもので、そのLAI調節能力を事前に確認したうえでCACOASに採用したものであった。とはいえ、新梢の形状を推定したときは(第4ステップ)、前年生枝の総長とは異なる個々の前年生枝の特性値や新梢の特性値の一部を使用したため、制限面積当り目標LAIと比較すると、ある程度の誤差の発生は避けられなかった。そこで、以下の制限面積当りLAIの調節処理を追加した。すなわち、(制限面積当り目標LAI / 実現した制限面積当りLAI)の比率を全ての葉数配列変数BLN(i)に乗じたもので

ある。なお、この調節処理は常時行わず、メニュー選択方式として、たとえば、樹形を変えながらも制限面積当りLAIを等しくしたうえで、光環境を比較するような場合に作動した。

剪定処理は、無条件間引き→新梢の条件付間引き→新梢の切り返し→LAI調節のための追加間引きの順に行った。芯抜きは、変則主幹形のように、その必要性が認められる場合に指示した。剪定処理のいずれの段階においても、間引いた枝は配列変数値で区別した。太枝剪除の場合はその太枝に着生した全ての小枝も無くなるように配列変数で区別した。無条件間引きとして、あらかじめ設定した南北樹幅制限、東西樹幅制限および樹高制限のいずれかに抵触したときは、抵触した新梢を着生した前年生枝を間引いた。ただし、樹形の乱れを避けるために、現時点のCACOASでは、いずれの抵触の場合でも間引き数は前年生枝1本に抑えた。

リンゴやセイヨウナシの樹種では、短枝の頂芽が花芽になり、翌年果実をつける可能性がある。また、アウトウでは短い結果母枝（前年生枝）の占める割合が非常に高い。そこで、あらかじめ短枝と発育枝を分ける長さの境界値を設定し、これ以下の長さの新梢を切り返さなかった。

新梢の条件付き間引きとして以下の4種を設けた。最初に樹冠下高さ制限内に存在する発育枝を間引いた。次に、あらかじめ設定した範囲外の分岐角度や傾斜角度をもつ発育枝を間引いた。この後、隣接した新梢が間引かれずに残ったときは、隣の新梢との間隔が狭くならないように、一定の間隔、たとえば、1本おき、あるいは、2本おきに間引いた。この場合は発育枝と短枝の両者を間引きの対象にした。

発育枝を間引く、あるいは、切り返すとき、この発育枝が太枝の延長枝ならば、樹形の維持や樹冠拡大の見地から慎重に行う必要がある。そこで、樹冠拡大期間に限り、頂芽から発達した発育枝は間引きの対象外とした。さらに、頂芽から発達した発育枝を切り返すとき、この発育枝が元々どの枝齢の枝を延長する役割を担っていたかを調査した（遡及的調査）。以下、延長する最も枝齢の高い枝を延長元枝と記した。CACOASでは樹冠拡大期間に限り、延長元枝の枝齢に対応した切り返し率を設定（初期入力）し、切り返し処理を施した。延長元枝の遡及的調査のアルゴリズムについては次節に記した。

上記までの剪定を終えた段階でも、残存した新梢総長が残存すべき新梢総長より大きかった場合は、LAI調節

のための追加間引きとして、前年生から6年生までの枝を間引いた。同齢の枝を多く間引かないように、たとえば、前年生枝の間引き割合が初期設定値に達したならば、2年生枝の間引きに移るようにした。さらに、間引く枝が樹冠内の同一部位に偏らないように、乱数を用いて樹冠内からまんべんなく選ぶようにした。この追加間引きのアルゴリズムについては次節に記した。

#### 7) 剪定後の樹形の作図ステップ（第9ステップ）

間引いた枝のデータを除き、切り返した枝については中心軸7点の空間座標を修正し、直径は肥大処理ステップで修正されているので、これらを用いて剪定後の樹形図を第5ステップと同様な方法で作成した。

#### 8) 剪定情報出力ステップ（第10ステップ）

剪定処理ステップ（第8ステップ）で行われた剪定に関連した以下の項目について集計し、出力した。すなわち、樹高制限への抵触の有無、南北樹幅制限への抵触の有無、東西樹幅制限への抵触の有無、残存新梢長目標値、残存新梢長実現値、枝齢別太枝間引きに伴って除かれた新梢の数と長さ、樹冠下高さ制限、傾斜角度、分岐角度および隣接の各条件付き間引きで間引いたそれぞれの新梢の数と長さ、間引いた新梢数の種類（発育枝・短枝）別内訳、間引いた新梢長の種類（発育枝・短枝）別内訳、平均切り返し率、合計切り返し数、当年生枝から6年生枝までのそれぞれのLAI調節のための追加間引き本数、残存した短枝数、剪定前と剪定後の新梢平均傾斜角度と新梢平均分岐角度およびそれぞれの標準偏差であった。これらの計算手法については次節に記した。

#### 9) 枝齢繰り上げステップ（第11ステップ）

残存した全ての枝の枝齢配列変数値に1を加えた。ただし、間引きにより無くなった枝の枝齢配列変数値には-1を代入し、以後のCACOAS全処理の対象外とした。

#### 10) OLEASによる光環境解析ステップ（オプションステップ）

樹冠解析ステップからの出力データの一つ、葉量の空間分布データ（BLN (i)）を果樹園光環境解析システム（OLEAS）に引き渡し、光環境を解析し、光環境情報を出力できるようにした。この場合、OLEASプログラムはCACOASに連動せず、光環境の解析を切り離して別に行うことができるようにした。このため、CACOASは最終樹齢までの毎年のBLN (i) ファイルを標準出力し、保存した。OLEASの実行の際、上記のBLN (i) のほかに、OLEAS専用のデータとパラメータである13時刻の投射光データ、吸光係数関連パラメータ、グリッド分割数、樹間距離、樹列間距離および個葉面積を入力した（山本、1999）。

OLEASは、典型的な晴天日あるは曇天日の、個葉に当たる光合成量子フラックス（以下、葉面PPF, leaf PPF）の1日あるいは時刻の平均値およびその分布データを、樹齢ごと、樹全体、グリッド段別およびグリッド列別（南北列と東西列）として計算し、出力した。また、グリッド段別およびグリッド列別の格子内個葉の葉面PPF段階（64段階）をカラーバーとともにカラーで表示し、また、必要に応じ、画像保存した。この機能により、数値によらず、パソコン画面上で樹冠内部の光環境の良否を判断できるようにした。

### 11) 骨格枝配置の選択ステップ（第2ステップ）

骨格枝配置の選択（第2ステップ）は樹形の選択・開発にとって最も重要なステップである。新梢の発生（第4ステップ）にはregression法を用いたのに対し、本ステップでは骨格枝の形状、姿勢および配置を人工的に与えた。このため、主幹の長さ、主枝数、主枝長、主枝の枝序角度の位相、第1主枝の枝序角度、主枝の分岐角度、主枝の発生間隔、主枝先端部の立ち上がり角度の緩急、亜主枝数、亜主枝長、亜主枝の枝序角度の位相、第1亜主枝の枝序角度、亜主枝の分岐角度、亜主枝の発生間隔などを任意に選び、組み合わせることができるようにした。ただし、上記選択肢の多くがアナログ値であるため、任意の数値を入力すると、極めて多数の組み合わせが生じ、かえって解析と選抜の効率は悪くなる。むしろ、大きく異なる幾つかの選択肢を準備し、シミュレーション結果の傾向を大づかみにとらえてから選択肢を絞り込む方が得策と考えた。そこで数値選択や自由設定の場合を除き、数個の分布カテゴリの選択肢や離散的な大きさを持った数段階の数値選択肢を準備した。主幹の長さ主幹の傾きは数値入力であった。主枝の湾曲の程度と分岐角度を組み合わせることにより、主枝先端部の立ち上がり角度の緩急がきまるので、5段階の主枝の曲率半径に対応した立ち上がり角度の緩急の選択肢を設けた。主枝数の選択肢は1本、2本、3本、4本、5本、6本、7本、13本および自由入力および亜主枝数の選択肢は1本、2本、3本、4本および5本であった。第1主枝または第1亜主枝の位置（いずれも各母枝基部からの距離）は数値入力であった。主枝長分布の選択肢には等長、下長上短、下短上長、中長上下短および中短上下長の5つの分布カテゴリおよび自由設定を設けた。第1主枝の発出方向角の選択肢は東、西、南、北、南東、南西、北東および北西であった。第1亜主枝の枝序角度の選択肢は0度、45度、90度、135度、180度、225度、270度および315度であった。主枝または

亜主枝の分岐角度分布の選択肢には等角度、下広上狭、上広下狭、中広上下狭および中狭上下広の5つの分布カテゴリおよび自由設定を設けた。主枝または亜主枝の発出間隔分布の選択肢には等間隔、下長上短および下短上長の3つの分布カテゴリおよび自由設定を設けた。なお、各分布カテゴリに対応した具体的数値の記載は冗長および改良の余地があるなどの理由から本報では省略した。

上記の選択肢を組み合わせ、骨格枝の中心軸上7点の空間座標、傾斜角度および方位角度をプログラム計算できるようにした。通常、主幹長は樹形の違い、長幹仕立てあるいは短幹仕立てなどで決められる。しかし、主枝総長や亜主枝総長は樹が占める地積や空間に比例するとみなすのが妥当であろう。そこで、果樹園での観察結果を参考にして、CACOASでは制限樹幅（m単位の数値）と制限樹高（m単位の数値）で計算できる占有空間容積の10分の1の長さ（制限樹高×南北制限樹幅×東西制限樹幅×0.1）を主枝総長の暫定値とした（m単位の数値）。たとえば、制限樹高が3.5m、南北制限樹幅が4mおよび東西制限樹幅が4mの場合、主枝総長暫定値は5.6mであった。亜主枝総長暫定値も同じ計算式で求めた。ただし、この長さの妥当性に対する疑義、あるいは、主枝総長や亜主枝総長をもっと自由に選択することも考慮し、これだけで主枝総長や亜主枝総長を決定せずに、自由な係数を上記2つの暫定値に乗じて、それぞれ、最終的な総長とした。これらの最終的な総長をもとに、上記の主枝あるいは亜主枝の長さの分布カテゴリに対応して個々の主枝や亜主枝の長さを自動的に計算できるようにした。

### 12) 制約条件と剪定条件の選択ステップ（第3ステップ）

第3ステップでは、剪定処理（第8ステップ）の工程全体を拘束する制約条件、すなわち、南北樹幅制限、東西樹幅制限、樹高制限、最下枝の高さ制限などの各制限値および年次別の制限面積あたり目標LAIを入力した。上記の制限値は計画密植栽培にも対応できるように、間伐年および間伐後の南北樹幅制限と東西樹幅制限も入力できるようにした。さらに、新梢を間引くときの分岐角度と傾斜角度の範囲、間引く新梢間隔、LAI調節のための枝齢別追加間引き割合および樹冠拡大を目的とした延長元枝の枝齢別切り返し率を入力した。

### 13) パラメータおよび初期データの入力ステップ（第1ステップ）

本ステップでは、新梢各特性値の重回帰推定式係数と定数項（合計7組）、重回帰推定法にモンテカルロシミュレーションを加味した手法に必要な残差標準誤差（重回帰分析結果の一部）および枝の直径の重回帰推

定式偏回帰係数と定数項（合計2組）を入力した。このほかに、作図パラメータ（回転角度、コンピュータグラフィックス関連パラメータ、作関数など）および新梢長と着葉数を関係づけるパラメータを入力した。これらの入力作業の煩雑さを避けるために、品種専用のパラメータファイルを事前に作成しておき、CACOASの実施ごと、指定したファイルを読ませるようにした。さらに、本システムで使用する全ての配列変数（約100個）を宣言するとともに、上記以外の初期入力データ（短枝と発育枝を区別する限界長、最終樹齢、樹列方向、枝序角度の位相、個葉面積および骨格枝構築の際の平均分岐角度や直径）を入力した。このほか、入力用あるいは出力用の多くのファイルに関連した命名ルールも本ステップで設定した。

## 2. CACOASプログラムに用いたアルゴリズムあるいは計算手法

### 1) CACOASプログラムの特徴と使用した配列変数

プログラムはvisual系BASICで作成し、総行約4600行であった。第5図はCACOASのフローチャートである

が、パソコンで稼働できる大きさ以下にメインプログラムを制限する必要から、プログラム本体はメインプログラムと数個のサブプログラムとした。一般的な回転マトリクス計算式に対応した座標系（山本, 1983）および移植した既報のプログラム資源（山本・伊藤, 1996；山本・山口, 1989；山本・畠, 1991）との整合性を考慮し、本システムの空間座標系を以下の様に設定した。xyz 直角座標とし、東西がx軸（東方向が正）、天地がy軸（天頂方向が正）、南北がz軸（北方向が正）とし（第2図）、樹中心を原点に設定した。OLEASの座標系（山本, 1999）はこれとは大きく異なり、座標値は3座標軸とも正、x座標軸は東西（西方向が大）、z座標軸は天地（地面方向が大）、y座標軸は南北（北が大）であった（第4図）。よって、CACOASからの出力データを使用する場合、OLEAS内に座標軸変換部分を新設した。

長さの単位は全てcmであった。角度の単位は度であり、プログラム計算内ではradianに変換した。方位角度は枝の分岐点と枝弧中間点を結ぶ直線の方向を、南中を0度とし、東方向に測ったものであった。傾斜角度はこの直線の傾きを、水平を0度とし、天頂側を正、地面側

Table 1. Types of array variables used in CACOAS, their abbreviations and units. S, index within parenthesis of each array name, denotes the produced order (branch number) of individual branch from the start.

Descriptions of array variables	Names of arrays	Units or values
Branch number of the parent branch for the Sth branch	B%(S)	
Produced order of the Sth branch within the parent one	N%(S)	
Age of the Sth branch	A%(S)	≥ 1 or -1
Total number of shoots on the Sth branch (biennial branch)	SN%(S)	
Distance of the basal point of the Sth branch from that of the parent one	DIS(S)	cm
X coordinates of the 7 points on the Sth branch	X1(S)~X7(S)	cm
Y coordinates of the 7 points on the Sth branch	Y1(S)~Y7(S)	cm
Z coordinates of the 7 points on the Sth branch	Z1(S)~Z7(S)	cm
Basal diameter of the Sth branch	DB(S)	cm
Terminal diameter of the Sth branch	DT(S)	cm
Radius of curvature of the Sth branch	R(S)	cm
Length of the Sth branch	L(S)	cm
Inclination angle of the Sth branch	IA(S)	°
Direction angle of the Sth branch measured from south in the east direction	DA(S)	°
Branching angle of the Sth branch	BA(S)	°
Rotation angle of the Sth branch measured from the earth axis by counterclockwise direction	RA(S)	°
Zenithal-rotation angle of the Sth branch, i.e., the absolute value of (180-RA(S))	ZRA(S)	°
Whether the Sth branch experienced heading back or not	P%(S)	1 or 0
Total number of leaves on the Sth branch	LN&(S)	
Total number of branches on the Sth branch	TN&(S)	
Total number of fruits on the Sth branch	F%(S)	

を負として測ったものであった。枝序角度は回転角度のため、このままでは重回帰分析の説明変数に取り込まれなかった。そこで、説明変数には枝序角度と180度の絶対差（以下、枝序天頂角度、ZRA ( )）を用いた。

毎年のシミュレーション過程で発生する順番（通し番号）である枝番号 (S) を添字とする多くの特性値配列変数を用いた（第1表）。なお、以後のアルゴリズムの説明上、前年生枝の枝番号をS、その上の新梢の枝番号を小文字のs、あるいは、母枝の枝番号をS、その子枝の枝番号を小文字のsで表記し、区別した。

## 2) 新梢特性値の推定計算手法

リンゴ‘ふじ’の新梢特性値の推定計算は以下の通りであった。重回帰推定した前年生枝上の新梢発生総数 (SN% (S)) を仮総数とした。次に、SN% (S) まで昇順にとった発生順番 (N% (s)) 目の新梢について、前年生枝基部点から新梢発生点までの距離 (DIS (s)) を重回帰推定した。SN% (S) とDIS (s) はともに推定誤差を伴ったため、前年生枝の長さ (L (S)) とSN% (S) 番目、すなわち、最先端の新梢発生点までの距離が一致しなかったときは、SN% (S) 番目までの距離をL (S) に代入した。(SN% (S) - 1) 番目以下の発生点までの距離が前年生枝の長さ (L (S)) を越えたときは (L (S)) をそのままにして、(SN% (S) - 1) 以下の値を新梢発生総数とし、推定済みのSN% (S) の値に置き換えた。新梢基部点の空間座標 (X1 (s), Y1 (s), Z1 (s)) は、DIS (s) と前年生枝中心軸7点の空間座標値 (X1 (S) ~ X7 (S), Y1 (S) ~ Y7 (S), Z1 (S) ~ Z7 (S)) とを用いて、後に示す計算により求めた。枝序角度 (RA (s)) は回転角度のため、regression法によるその推定は困難と判断した。そこで、新梢第1枝の枝序角度は乱数を用いて与え、第2枝以降は樹種に特有な枝序角度の位相を順次加えて計算し、360度以内の値に変換した。ほとんどの新梢は腋芽から発生するため、枝序角度の位相は葉序の位相に等しいと考えて大きな誤りはない。ただし、先端から発生する新梢は、頂芽由来あるいは切り返し部の腋芽由来の2つのケースがあるが、その伸長方向は前年生枝のそれにほぼ近いと見なして、枝序角度を上記の方法で与え、分岐角度は5度×乱数値 (< 1) の値で与えた。この処理により伸長方向は前年生枝のそれにほぼ近くなる。新梢長 (L (s))、分岐角度 (BA (s))、基部直径 (DB (s))、先端部直径 (DT (s)) および曲率半径 (R (s)) は重回帰推定法単独あるいはこれにモンテカルロシミュレーション法を組み合わせるプログラム計算できるようにし

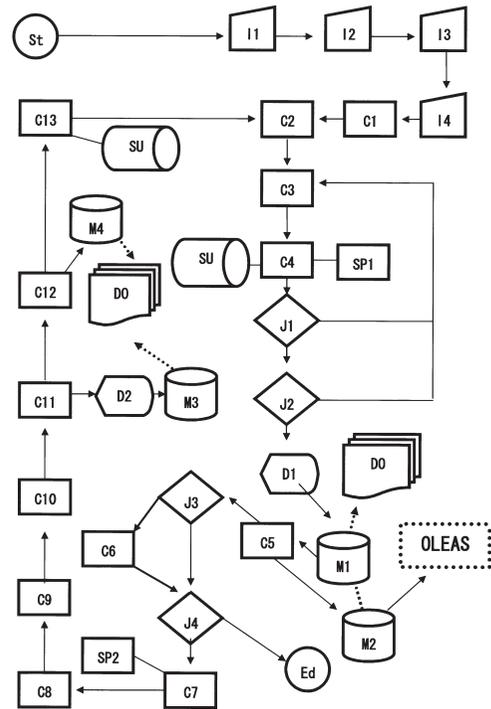


Fig. 5. The flow chart of CACOAS. St : Start, Ed : End, I1 : Input of initial data, I2 : Input of parameters, I3 : Input of selection of configuration of frame branches, I4 : Selection of restrictions and requirements for pruning, C1 : Calculation of coordinates of frame branches, C2 : Renewal of tree age, C3 : Renewal of branch number, C4 : Estimating of all variables of a shoot and calculating of the shoot coordinates, SP1 : Subroutine programs to estimate shoot variables, SU : Substituting of values of array variables, J1 : Last order of shoot or not?, J2 : Last biennial branch or not?, D1 : Displaying tree forms and tree canopy forms, M1 : Saving of image files of tree form and tree canopy form in a disk, C5 : Analyzing several informations of a tree crown, M2 : Saving of distribution files of both branches and leaves in a disk, D0 : Printing of documents of various results, J3 : Is LAI per limited area equal to the desired value or not?, C6 : Adjusting of LAI per limited area, J4 : Last tree age or not?, C7 : Thickening of all branches, SP2 : Subroutine programs to estimate branch diameters, C8 : Forcible thinning based on the restrictions and the requirements, C9 : Thinning by shoot posture, C10 : Heading back of shoot, C11 : Thinning of thick branches in order to regulate LAI per limited area, D2 : Displaying of tree form after pruning, M3 : Saving of image files of tree form after pruning in a disk, C12 : Aggregating of information data concerning pruning and the statistical processing, M4 : Saving of information files concerning pruning in a disk, C13 : Age renewal of all branches by 1-year-old.

た。

新梢基部点の空間座標の計算は以下の方法によった。前年生枝上7点の空間座標は記憶されたので、その基部点から残りの6点までのそれぞれについて枝を經由した距離（以下、累積距離）を計算した。次に新梢のDIS (s) と累積距離の大小を比較し、(n番目の点までの累積距離)  $\leq$  DIS (s) < (n+1番目の点までの累積距離) の大小関係を満たすnを検出した。前年生枝上n番目の点の空間座標 (X<sub>n</sub>, Y<sub>n</sub>, Z<sub>n</sub>) とn+1番目の点の空間座標 (X<sub>n+1</sub>, Y<sub>n+1</sub>, Z<sub>n+1</sub>) を用いて、(2) ~ (4) 式により新梢基部点の空間座標を計算した。

$$\text{新梢基部点のX座標 } (X1(s)) = (X_n + \lambda X_{n+1}) / (1 + \lambda) \tag{2}$$

$$\text{新梢基部点のY座標 } (Y1(s)) = (Y_n + \lambda Y_{n+1}) / (1 + \lambda) \tag{3}$$

$$\text{新梢基部点のZ座標 } (Z1(s)) = (Z_n + \lambda Z_{n+1}) / (1 + \lambda) \tag{4}$$

ここで、比 $\lambda$ は(5)式で与えた。

$$\lambda = (\text{DIS}(s) - n\text{番目の点までの累積距離}) / (n+1\text{番目の点までの累積距離} - \text{DIS}(s)) \tag{5}$$

3) 新梢中心軸上7点の空間座標の計算

記憶された前年生枝の傾斜角度 (IA (S)) と方位角度 (DA (S)), 推定された新梢の長さ (L (s)), 曲率半径 (R (s)), 分岐角度 (BA (s)) および枝序角度 (RA (s)) および計算された新梢基部点の空間座標 (X1 (s), Y1 (s), Z1 (s)) を用いた新梢中心軸7点の空間座標の計算方法を以下に記す。一般に、任意の長さを持ち、片方の端を定位置に置きながら任意の姿勢を保つ湾曲線上等間隔7点の空間座標を求める計算は困難である。そこで、湾曲が真円状であり、かつ、湾曲方向が地軸方向であるという単純化を行うことで可能な計算方法を、2段階に分けて説明したい。なお、この単純化が許される理由は考察に記した。

一方の端をxyz座標原点に置き、yz平面上の一本の弧を考えた。この弧は任意の曲率半径R, 弧長Lおよびy軸に対する分岐角度BAをもつ。第6図aのように、BAが90度より小さいときの弧の中間点をBとした。弧ABの中心角 $\gamma$  ( $=360L / (4\pi R)$ ) により $\angle OAB$ が計算できるので (すなわち、 $\angle OAB = (180 - \gamma) / 2$ )、線分AOの傾斜角度 $\kappa$ は $\gamma$ とBAを用いて(6)式で計算できた。 $\kappa = 90 - \lambda = 90 - ((180 - \gamma) / 2 - BA)$  (6)

この弧上の任意の点Nの中心角を $\epsilon$ とすれば、公式より弦ANの長さは  $2R \sin(\epsilon / 2)$  に等しい (宮本・松田,

1964)。また、弦ANとz軸とがなす角度 $\eta$ は(7)式で計算できた。

$$\eta = 180 - (180 - \epsilon) / 2 - \kappa \tag{7}$$

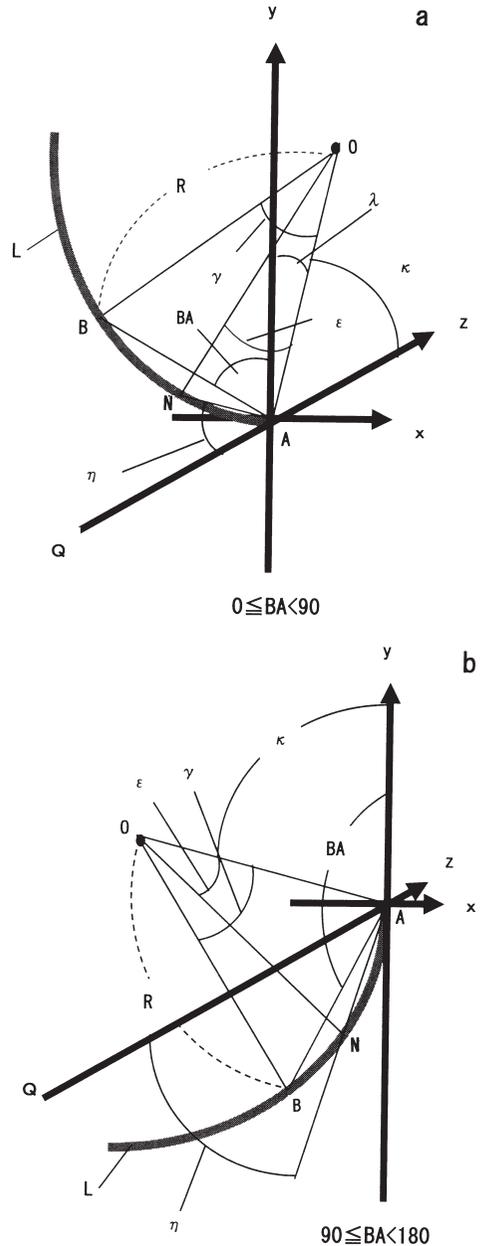


Fig.6. One arc (or a shoot) in the yz plane. BA, R and L denotes the branching angle of the arc (a :  $0^\circ \leq BA < 90^\circ$ , b :  $90^\circ \leq BA < 180^\circ$ ), the radius of curvature and the length, respectively.

したがって、弧上の任意の点Nのyz平面座標の計算には、 $y = 2R \sin(\varepsilon/2) \sin \eta$  および  $z = -2R \sin(\varepsilon/2) \cos \eta$  の2つの式を用いることができた。ただし、点Nのx座標値は0であった。上記の計算を等間隔にとった弧上の6点に当てはめた(8)~(13)式から  $\varepsilon_1 \sim \varepsilon_6$  を求め、(7)式の  $\varepsilon$  にそれぞれ代入し、各点のzy座標を計算した。

$$1/6 \text{ 点と原点を結ぶ弧の中心角} = \varepsilon_1 = 360 (L/6) / (2R\pi) \quad (8)$$

$$2/6 \text{ の点と原点を結ぶ弧の中心角} = \varepsilon_2 = 360 (2L/6) / (2R\pi) \quad (9)$$

$$3/6 \text{ の点と原点を結ぶ弧の中心角} = \varepsilon_3 = 360 (3L/6) / (2R\pi) \quad (10)$$

$$4/6 \text{ の点と原点を結ぶ弧の中心角} = \varepsilon_4 = 360 (4L/6) / (2R\pi) \quad (11)$$

$$5/6 \text{ の点と原点を結ぶ弧の中心角} = \varepsilon_5 = 360 (5L/6) / (2R\pi) \quad (12)$$

$$6/6 \text{ の点と原点を結ぶ弧の中心角} = \varepsilon_6 = 360 (6L/6) / (2R\pi) \quad (13)$$

分岐角度が  $90 < BA \leq 180$  の場合(第6図b)も、 $\gamma$ 、 $\varepsilon$  および  $\angle OAB$  は  $BA < 90$  の場合と同じ方法で得られた。ここで、 $\kappa$  を線分AOのy軸に対する角度とすれば、 $\kappa = BA - (180 - \gamma)/2$  に等しい。この弧上の任意の点をNとすれば(14)および(15)式が得られる。

$$\angle QAO = 90 - \kappa \quad (14)$$

$$\eta = \angle QAN = (180 - \varepsilon)/2 - \angle QAO = (180 - \varepsilon)/2 - 90 + \kappa \quad (15)$$

したがって、 $y = -2R \sin(\varepsilon/2) \sin \eta$  および  $z = -2R \sin(\varepsilon/2) \cos \eta$  の2つの式を用いて弧上の任意の点Nのyz平面座標を計算した。

上記(第6図)は一方の端をxyz座標の原点に置き、y軸に対する分岐角度がBAのyz平面内の弧の場合であった。次にyz平面内でz軸に対して垂直に置かれた前年生枝から、第6図と同じ形状(分岐角度BA、弧長Lおよび曲率半径R)の弧(新梢)が任意の枝序角度RAで発生する場合を取り上げる。さらに、この前年生枝がその基部点をxyz座標の原点に置いたまま任意の傾斜角度IAと方位角度DAだけ姿勢を変化したときの弧(新梢)の空間座標の変化を考える。ここでのxyz座標系は一般的な回転マトリクス計算式(山本, 1983)に対応したもので、x座標は向かって右(東)方向が大、y座標は上(天頂)方向が大、およびz座標は向かって奥(北)方向が大とした(第7図)。弧の中間点bと弧の着生点aを結ぶ直線が、y軸に対して分岐角度BAで交差したことは第6

図aと同じであった。次に、b点から枝序角度RAだけ図中の円錐台底面の円に沿ってy軸が大なる方向を見ながら時計針方向に回転した点をcとした。x軸を中心にx軸が大なる方向を見ながら時計針方向に前年生枝の天頂角度(90-IA)だけc点を回転した点をc'とした。さらに、y軸を中心にy軸が大なる方向を見ながら時計針方向に前年生枝の方位角度(DA)だけc'を回転したときの点をc''とした。すなわち、第7図の折れ線gacは回転前、折れ線ga'c'は折れ線gacを天頂角度(すなわち、90-傾斜角度)だけ回転したもの、折れ線ga''c''は折れ線ga'c'を方位角度だけ回転したものであった。上記は弧上の中間点の軌跡であったが、弧の均等6分割点についても同様に求めることができた。以上が新梢中心軸7点の空間座標計算原理であった。

上記の計算原理に基づき、CACOAS内の配列変数値を用いたプログラム計算手法は以下の通りであった。IAには前年生枝の傾斜角度(IA(S))、DAには前年生枝の方位角度(DA(S))およびRAには新梢の枝序角度(RA(s))を代入した。次に、第6図で計算した7点の座標値(x座標は全て0)を用いて、第7図のように、x軸とz軸に対しては回転無し、y軸を中心に時計針方向にRA度回転するように回転マトリクスを求め、回転式で回転座標を計算した。次に、この回転で生じた7点の座標値をy軸とz軸に対しては回転無し、x軸を中心に時計針方向に(90-IA)度回転するように回転マトリクスを求め、回転式で回転座標を計算した。次にこの回転で生じた7点の座標値をx軸とz軸に対して回転無し、y軸を中心に時計針方向にDA度回転するように回転マトリクス値を求め、回転式で回転座標を計算すれば、新梢中心軸7点の空間座標になった。上記の計算は前年生枝の基部点をxyz座標系の原点に当てたので、回転後の上記各座標値に前年生枝の基部点の地上座標(X1(S)、Y1(S))およびZ1(S)をそれぞれ加えれば、新梢中心軸上の7点の地上座標(X1(s)~X7(s)、Y1(s)~Y7(s)、Z1(s)~Z7(s))が確定できた。新梢の傾斜角度(IA(s))や方位角度(DA(s))はこの7点座標から計算できた。

#### 4) 新梢の傾斜角度計算

上記の新梢中心軸7点のうち、基部点(第1点)と第4点を結ぶ直線のxz平面への投影線の長さに対する2点のy座標差の比率を計算し(第8図)、さらに比率の逆正接値を計算して傾斜角度(IA)とした。ただし、新梢の基部点から第4点に向かう直線の傾斜角度のため、正

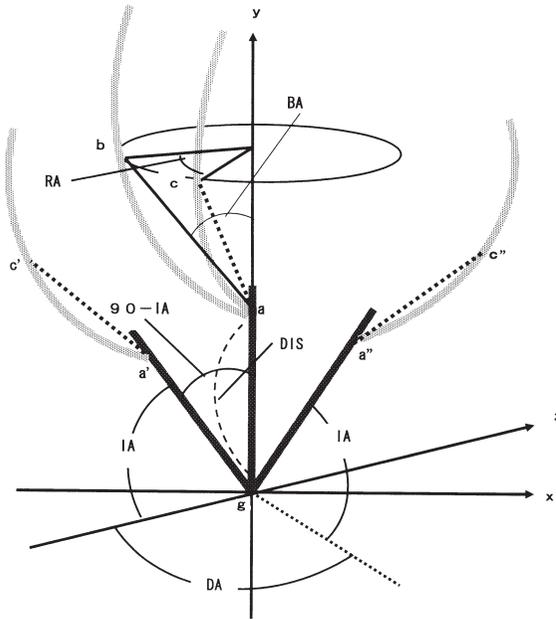


Fig. 7. The arc  $\underline{ab}$  (or the shoot) is same as the arc  $\underline{AB}$  in Fig. 6 on a parallel line ( $\underline{ga}$ , a biennial branch) to the y axis. The arc  $\underline{ac}$ ,  $\underline{a'c'}$  and  $\underline{a''c''}$  denotes the arc formed by turning of the arc  $\underline{ab}$  through RA round the y axis, that of the arc  $\underline{ac}$  through  $90-IA$  round the x axis and that of the arc  $\underline{a'c'}$  through DA round the y axis, respectively. DIS denotes the distance of the basal point of the shoot from that of the biennial branch.

負の値を有した。

5) 新梢の方位角度計算

方位角度 (DA) も傾斜角度と同様に、上記2点の投影線のz座標差に対するx座標差の比率を計算し (第8図)、さらに比率の逆正接値を計算し、 $\theta$ とした。ただし、CACOASでは方位角度 (DA) は南中から東方向に測ったので、方位角度は上記投影線の第4点側の向きがxz平面の第1象限のときは $\theta$ 、第2象限のときは $180-\theta$ 、第3象限のときは $360-\theta$ 、第4象限のときは $180+\theta$ とした。

6) 重回帰推定にモンテカルロシミュレーション法を加味した方法のアルゴリズム

前節に記したごとく、重回帰分析における残差標準誤差 (d) を標準偏差とした正規分布の確率密度で偶然的

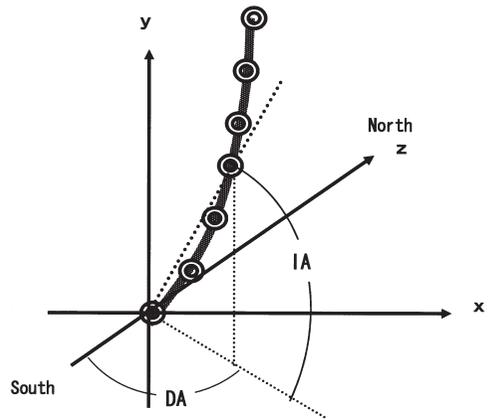


Fig. 8. A straight line connects the basal point of a shoot with the central point. The inclination angle (IA) of the shoot was defined as an angle of the straight line crossed for the xy plane. The direction angle (DA) was defined as an angle of the straight line crossed for the yz plane measured from south in the east direction.

に分布する誤差を重回帰推定値 (V) に加えて新梢の特性値の最終推定値とすれば、自然下の偶然的変動を擬似的に再現できると考えた。このために以下の計算手法を考案した。第3図における重回帰推定値 (V) を一時的に0に置き換えたうえで、0からの偏差をxとする正規分布式の  $\phi(x) = \exp(-x^2/(2d^2)) / (d(2\pi)^{0.5})$  および  $-2d$  から  $2d$  までの x の範囲を n 個の階級に区分したときの各階級の中央値を  $\underline{x}$  とを用いて以下の3つの配列変数を作成した。すなわち、いずれも階級の順番 (1~n) を添字とする  $\phi(\underline{x})$  の確率密度の配列変数 (P(1)~P(n))、 $\phi(\underline{x})$  の累積値 (累積確率密度) の配列変数 (CP(1)~CP(n)) および  $\underline{x}$  値の配列変数 (DV(1)~DV(n)) を作成した。次に、新梢の特性値の重回帰推定のたびに、疑似乱数を発生させ、疑似乱数値に最も近いCP(j)を探し、この添字(j)をもつ配列変数値DV(j)をVに加えて最終推定値とした。 $-2d$  から  $2d$  の範囲に限定したのは乱数値による極値発生を避けたためである。なお、重回帰推定値 (V) を一時的に0に置き換えた理由は、第1ステップのdの入力直後に3種類の配列変数 (P(), CP()) およびDV() を自動的に作成しておくことで第4ステップの計算時間を減らすためであった。

### 7) 骨格枝特性値の計算方法

骨格枝（主幹、主枝および亜主枝）の形状や姿勢に関する特性値については、第2ステップの選択肢に基づきこれらをプログラム計算し、骨格枝の各配列変数に代入した。骨格枝の枝番号は主幹、主枝、亜主枝の順にそれぞれの合計数を用いて自動計算した。ただし、骨格枝中心軸7点の空間座標、傾斜角度および方位角度は新梢の場合と同様に計算し、それぞれの配列変数に代入した。なお、栽培者や関連する技術者は、細形主幹形のような樹形には、主枝や亜主枝の用語を用いず、代わりに側枝の用語を伝統的に用いているが、CACOASではこの使い分けは行わず、前者に統一した。

### 8) 樹冠解析の計算手法

樹冠解析ステップの解析項目のうち最も重要で、かつ、基礎的なものは葉量の空間分布であった。グリッド中の*i*番目のブロックの葉数を示す配列変数 (BLN (*i*)) はOLEASへの入力データも兼ねた。よって、樹冠解析ステップのグリッドはOLEASと同じ物を用いた (第4図)。新梢7点座標のデータから葉の着生点の座標を求めるために以下の計算を行った。すなわち、新梢長を用いて着葉数を計算するための一次回帰式の勾配と切片 (山本・山口, 1989) により、新梢基部から微小な距離の単位で移動し、この移動距離に勾配値を乗じて葉1枚増えるたびに、増えた点の空間座標を算出した。短枝についてはその先端座標に短枝当たりの平均葉数を配置した。これらの空間座標をOLEAS専用の空間座標に変換後、この空間座標が含まれるブロックの添字*i*をもつ葉数配列変数 (BLN (*i*)) に葉数を加えた。樹冠実容積、葉層容積、外部無効容積、内部無効容積、全無効容積、はげあがり程度、平均葉密度、南北樹幅、東西樹幅、樹高および葉面積指数 (LAI) はBLN (*i*) を用いて計算した。グリッド底面格子の各正方形の真上方向に位置する全ブロックの葉数を累計し、累計葉数が1枚以上のグリッド底面格子の正方形面積を合計し、樹冠占有面積とした。このほか、BLN (*i*) を用いて葉の存在するブロックを積み木のように重ね、視角度を変えて見えるように表現したソリッドモデル図も作図し、また、これらの作図画像を保存できるようにした。上記解析項目の計算には既報 (山本・山口, 1989) のプログラム資源を移植したので、その計算手法の説明は省略した。樹冠下空間容積は、BLN (*i*) を用いて、樹冠下に限定したグリッド底面格子の各正方形の真上方向にある葉の存在しない最も高い位置のブロックまでの容積を合計したものであった。樹冠外周部空間

容積は制限樹幅と制限樹高で計算される直方体容積から樹冠占有面積×制限樹高の容積を差し引いたものであった。樹冠外周部空間容積に樹冠下空間容積を加えたものを作業空間容積 (working space) とした。枝の総体積は基部直径、先端部直径および枝の長さの各配列変数値を用い、枝を円錐台とみなして枝体積を計算し、全枝分合計した。枝の総体積に対する葉の総面積の比を計算した (以下、葉枝比、単位は $\text{cm}^2\text{cm}^{-3}$ )。枝量の空間分布は各ブロック内部を横断する枝の数をブロックごと累計し、配列変数として表現したもので、枝の混み合い程度の指標として利用できる。さらに、樹冠の東西南北と上下の各方向への最大距離を調査し、樹幅制限、樹高制限および最下枝の高さ制限への抵触の有無を調査した。このほか新梢の傾斜角度分布、分岐角度分布および新梢長分布は配列変数を用いて計算した。

CACOASは樹列間 (ときに、樹間) に作業用の空間を確保し、この作業用の空間に樹冠を張り出させない考えに立っている。したがって、樹間距離あるいは樹列間距離と制限樹幅とは意味が異なった (実際にはこれが混同される場合が多い)。よって、葉面積指数 (LAI) の表現は従来から使用されている樹冠占有面積当たりの葉面積指数 (LAIc) と果樹園当たりの葉面積指数 (LAIo) に、制限面積当たりの葉面積指数 (LAIla) を新たに加えて3種類とした。これらは、合計葉数に個葉面積を乗じた合計葉面積を、それぞれ、樹冠占有土地面積、樹間距離と樹列間距離で計算した土地面積および南北制限樹幅×東西制限樹幅で計算した制限土地面積で割ったものであった。

### 9) 樹形・樹冠形作図のアルゴリズム

CACOASにおける樹形や樹冠形の作図には、枝中心軸7点の空間座標および枝径および新梢長から着生葉数を計算する一次回帰式のパラメータ (山本・山口, 1989) を用いた。パソコン作図画面の横幅中心位置に主幹を置き、視角度の変更のたびに、作図幅を計算し、樹冠全体が作図画面内に入るように作図データを縮小した。枝の作図にはvisual系 BASICのグラフィックス命令を用いた。作図画面の大きさは変わらないまま、樹冠サイズは樹齢とともに大きくなったので、枝は相対的に細くなった。しかし、画素幅より細くできなかつたため、新梢のような細い枝の描画には太さの正確さを欠いた。空間座標 ( $x_0, y_0$  および  $z_0$ ) を一律縮小して画面座標 ( $x, y$ ) として投影する平行投影法は樹冠の大きさを客観的に把握するのに都合が良い ( $x=kx_0$  および  $y=ky_0$ 、ただし、 $k$ は縮小率)。鳥瞰図のように、肉眼とほぼ同じように見

える透視図法（山本，1983）には，肉眼の透視の強さのパラメータ（ $\alpha$ ）を用いた．遠距離（ $z_0$ 座標が大）ほど $x$ 座標や $y$ 座標が小さく投影される関係，すなわち， $x=x_0/(\alpha z_0)$  および $y=y_0/(\alpha z_0)$  の式を用いて作図画面の平面座標を計算した．肉眼では $\alpha \approx 0.35$ であった．1枚1枚の葉の外形は葉の姿勢や着生位置，葉序，視角度などによって多様に変化し，不定形といっても過言でない．これらの葉が重なってできる葉群の外形も不定形であろう．そこで，葉の位置や個葉面積の客観的正確さを残し，かつ，不定形を実現する効率的な作図アルゴリズムを考案した．新梢長から着葉数を推定する一次回帰式における勾配と切片により葉の着生点の空間座標を計算した．この着生点を出発点として作図画面の大きさに対する個葉面積の相対的大きさに相当する画素数だけ移動しながら，画素斑点（ドット）を描画した．なお，1回移動するたびに乱数を用いて方向を決めたので，結果的に不定形になった．また，方向によってはドットがほぼ同じ位置に描画することもあった．画面の大きさに比較すると葉の着生間隔が極めて小さかったため，たいていの葉はすこしずつ重なった．これは自然の葉群を遠くから見た場合に匹敵する．短枝葉の作図は短枝先端の近辺をわずかに移動しながら，短枝当たりの着葉数分だけ上記同様な描画を行った．数十年にわたる樹形や樹冠形の画像は大容量になったため，画像ファイルとして保存するかどうかが，あらかじめ年次ごとに選択できるようにした．

#### 10) 枝の肥大処理のアルゴリズム

広範囲の枝齢について，対象枝の特性値（基部直径，先端部直径，着生する順番，枝齢，長さ，傾斜角度，方位角度，分岐角度，枝序角度，曲率半径，着生子枝総数，着生果実総数）およびその母枝の特性値（基部直径，先端部直径，長さ，傾斜角度，方位角度，曲率半径，分岐角度，着生子枝総数，着生果実総数）の調査を行った（詳細については次節のパラメータ入手のための実験法を参照）．この調査結果を用いた枝の基部直径あるいは先端部直径を推定する2つの重回帰推定式を作成した．CACOASの第1ステップで上記重回帰推定式の偏回帰係数を入力した．対象枝（枝番号は $s$ ）の特性値（ $N\%(s)$ ， $A\%(s)$ ， $L(s)$ ， $IA(s)$ ， $DA(s)$ ， $BA(s)$ ， $RA(s)$ ， $R(s)$ ， $TN\&(s)$  および $F\%(s)$ ）およびその母枝（枝番号は $S$ ）の特性値（ $DB(S)$ ， $DT(S)$ ， $L(S)$ ， $IA(S)$ ， $DA(S)$ ， $R(S)$ ， $BA(S)$ ， $TN\&(S)$  および $F\%(S)$ ）は第4ステップで得られ，あるいは記憶されていた．枝の肥大処理ステップでは，重回帰式に取り込まれた説明変数を自動的に読み込み，対

象枝の基部直径（ $DB(s)$ ）および先端部直径（ $DT(s)$ ）を推定した．次に，上記の重回帰式における推定対象枝の枝齢変数 $A\%(s)$ を1年増やし，他の説明変数は同じにして，基部直径をもう1回推定し，2つの重回帰推定値の差を，その枝その年の基部肥大量とした．第4ステップですでに計算された基部直径（ $DB(s)$ ）にこの肥大量を加え，肥大後の基部直径とした（(16)式）．先端部の肥大後の直径も同様に計算した（(17)式）．

$$\text{肥大後の基部直径} = \text{記憶された基部直径} + \text{基部肥大量} \quad (16)$$

$$\text{肥大後の先端部直径} = \text{記憶された先端部直径} + \text{先端部肥大量} \quad (17)$$

重回帰式の説明変数には推定対象枝の母枝の直径を含んだことから，上記の処理を全枝に施す場合，肥大処理後の直径を説明変数に使用しないように，枝齢の昇順に行った．ただし，新梢についてはこの肥大処理は行わず，第4ステップにおける枝の直径の重回帰推定値を肥大処理済みのものと見なした．なぜならば，第4ステップに関連した重回帰分析用データの測定は新梢の肥大のほぼ終了した落葉後（冬季）に測定されたからである．

なお，説明変数である子枝着生総数および果実着生総数は第4ステップでは計算できなかったため，別途計算した．この計算手法は本節の12)に記した．

#### 11) 剪定処理のアルゴリズム

剪定処理の全工程は前節に記した．ここでは，剪定ステップで用いた各種のアルゴリズムを記す．

CACOAS内の剪定ステップで行われる間引きや新梢の切り返しの際，以下の処理を必ず施した．間引いた枝の枝齢配列変数に $-1$ を代入し（ $A\%(S) = -1$ ），以後この枝は存在しないものとして区別した（ただし，パソコンのメモリからは消えない）．切り返した新梢の切り返し履歴変数 $P\%(s)$ に $1$ を代入した．また，切り返し処理では，新梢の長さの配列変数値（ $L(s)$ ）を{切り返し処理前の値 $\times (1 - \text{切り返し率}(\%)/100)$ }で置き換え（すなわち，新梢の長さを縮小し），必ずこの直後に新梢中心軸7点の空間座標を第4ステップと同等のプログラムを用いて修正計算した．このプログラム計算に必要な変数のうち，新梢の長さ（ $L(s)$ ）だけが従前と異なった．これに続き，新梢の傾斜角度（ $IA(s)$ ）と方位角度（ $DA(s)$ ）を必ず再計算した．

実際の剪定では枝齢の高い枝の間引きは，着生した子枝，孫枝もいっしょに除かれる．しかし，CACOAS内で間引き対象枝の枝齢配列変数（ $A\%(S)$ ）に $-1$ を代入

しただけでは、子枝や孫枝を除去できなかった。そこで、たとえば、6年生枝を間引いたとき、これに着生した子枝（5年生枝）を除去し、除去した5年生枝に着生した4年生枝を引き続き除去し、同様な処理を、新梢の除去まで続ける一連のサブルーチンプログラムを考案した。すなわち、間引き対象枝の除去が行われたならば、枝番号ループの中で、枝齢フィルタを通しながら、これより1年若い枝の各々について、その母枝の枝番号を参照し、間引き対象枝の枝番号と一致したとき、その子枝を除去した。引き続き、同様な子枝除去を新梢まで行った。

LAI調節を目的とした追加間引きでは、枝の混み合い程度を調査し、混み合い程度の高い順に間引くのが理想的である。しかし、枝の混み合い程度の調査に長時間を要し、また、間引くたびに枝の混み合い程度を調査し直さねばならず、計算所要時間が極端に増大した。そこで、枝番号最大値に乱数を乗じてできる値の整数部に等しい枝番号の枝に、該当する枝齢のフィルタを通過したものを間引いた。この方法は理想的なものではなかったが、短時間に樹冠全体からほぼまんべんなく間引くことが可能であった。

すでに記したように（第8ステップ）、樹冠拡大を優先するための方策として、延長元枝の枝齢に対応した切り返し率を用いた。延長元枝の遡及的調査には、以下のアルゴリズムを用いた。最初に切り返し対象である新梢の枝番号(s)から前年生枝(母枝)の枝番号S(=B%(s))を参照し、引き続き、新梢の着生順番(N%(s))と前年生枝の子枝着生総数(SN%(S))の両配列変数値から、この新梢が前年生枝上の頂芽由来のものか、または、腋芽由来のものかを判別した。仮に腋芽由来であるならば、この新梢が延長枝として役立つ元枝は新梢自身であり、元枝枝齢は当年生になる。仮に頂芽由来であれば、少なくともこの段階では、この新梢が延長枝として役立つ元枝は前年生枝であり、元枝枝齢は前年生になる。後者の場合には、さらに同様の遡及的調査を続け、腋芽由来に到達したときは、その腋芽から発達した枝の枝齢を元枝枝齢とした。たとえば、遡及的調査の結果、主枝の頂芽に行き当たり、この主枝が主幹の腋芽由来のものであったならば、切り返し対象であった発育枝は主枝を延長する役割をもっていたことになる。骨格枝づくりの観点から、通常、この発育枝は間引きしてはならず、当分の間、主枝を延長させる配慮をもって切り変えず。

樹高制限、樹幅制限および最下枝の高さ制限のいずれかに抵触した場合の間引き（無条件間引き）には、樹冠

解析ステップからの各方向へのはみ出し情報を利用した。すなわち、はみ出した枝（通常、新梢）を捜し、この新梢を着生した前年生枝を間引いた。これを捜すには、新梢の少なくとも先端部（7点目）のはみ出しやすいと考へ、樹中心からその点までの平行距離、たとえば、東方向ならば、7点目のx座標(X7(s))と中心(x=0)との差の最も大きい枝を見出し、除去した。

無条件間引きあるいはLAI調節のための追加間引きの際、間引いた枝がその母枝上の先端枝であった場合には、ある困った問題が発生した。すなわち、その基部側隣接枝（兄枝）から母枝先端部までの間に子枝の無い状態（以下、盲枝状態）が生まれた。実際の間引き剪定で先端部の枝を間引くとき、この盲枝状態の発生を避けて、基部側隣接枝の着生部との境にハサミを入れ、その先端側を剪除する。しかし、CACOASの配列変数値置き換え方式による間引き処理は1本単位に施したので、盲枝状態を無くす処理（母枝長の縮小処理）を別途施さねばならなかった。さらに、この場合の間引き枝はその母枝上の先端枝であるので、間引き後は先端から2番目の子枝が先端枝になる。このための変更処理が必要であった。なぜならば、CACOAS内の多くの処理が母枝上の先端枝であるかどうかの参照を頻繁に行ったためである。そこで、無条件間引きあるいはLAI調節のための追加間引きに限って、以下の母枝長の変更処理および先端枝変更処理を行った。すなわち、枝齢が当年生から樹齢までの昇順ループの内部で、枝番号が最大枝番号から1までの降順ループを設定した。そして、間引いた子枝が先端枝の場合に限り、1年若く、かつ、基部側に隣接した子枝をその母枝の先端枝に変更した。さらに、変更した子枝までの距離(DIS(s))を母枝の長さ(L(S))に代入し、7点座標なども変更した。つまり、母枝の長さで7点座標の両者の変更により盲枝状態を無くすことができた。先端枝の変更には以下のアルゴリズムを用いた。第4ステップで確定した前年生枝上の新梢着生総数(SN%(S))および新梢の着生順番(N%(s))の数値は枝齢が変わってもそのまま記憶されていたので、上記のような盲枝状態を無くすときに限って、母枝の子枝総数SN%(S)に新たに先端枝になった枝の着生順番N%(s)を代入しておけば、以降の処理の中でも混乱なく先端枝判定が可能であった。

隣接した新梢による混雑を無くすための間引き（以下、隣接枝間引き）の場合には、以下のアルゴリズムを用いた。前年生枝が変わるたびに新梢発生順番を示すフラグ

値を0で初期化し、以前に間引きされた新梢の着生順も含め、着生順をフラグ値に代入した。1本おき間引きの場合はフラグ値を2で割り、2本おき間引きの場合はフラグ値を3で割り、3本おき間引きの場合はフラグ値を4で割り、いずれも、剰余が1のとき間引いた。何本おきに間引くかは自由選択とした。なお、新梢の条件付き間引きでは前年生枝上の先端新梢は樹冠拡大期間に限り間引き対象外になっていたため、上記のフラグ値だけで処理すると、ときに先端新梢に隣接した新梢が残る。また、先端新梢の伸長方向が隣接新梢のそれに近いときには平行枝が形成される。そこで、剰余が1以外のときでも対象枝が先端部から数えて2番目の場合も例外的に間引いた。

剪定情報出力ステップの出力項目の一つに平均切り返し率を設けた。これは、切り返し剪定処理ごと、切り返し率と切り返し新梢数を累計し、すべての剪定処理が終了した時点で、前者を後者で除したものであった。一方、CACOASの剪定工程では、切り返し剪定の後にLAI調節のための追加間引きが続いた。したがって、切り返し剪定を施した枝をその後間引くことによる平均切り返し率の過大評価が生じる。これを是正するために、切り返し歴を有した新梢がその後間引かれたときは上記2つの累積値からその分を差し引いた。

## 12) その他のアルゴリズム

枝の肥大処理に関連した枝直径重回帰分析の説明変数に、対象枝の着生総葉数(LN&(S))、着生総枝数(TN&(S))および着生総果実数(F%(S))が含まれた。樹種や品種によっては、この3者が上記重回帰式の説明変数に取り込まれる可能性がある。しかし、この3者は、性格上、第4ステップでは計算できなかったため、枝の肥大処理ステップの直前で、CACOAS内部データなどを用いて別途計算した。樹冠解析ステップにおける葉数計算と同じ要領で、全ての新梢の着葉数(LN&(s))を計算したうえで、枝齢が前年生から(樹齢-1)年生までの昇順ループの中に、枝番号が1から最大値までのループを設定し、子枝の着生総葉数(LN&(s))をその母枝の着生総葉数(LN&(S))に加算した。この計算手法により、ループを終えると、全ての枝の着生総葉数が計算できた。同様に、枝齢が前年生から(樹齢-1)年生までの昇順のループの中に、枝番号が1から最大値までのループを設定し、子枝の着生総枝数(TN&(s))をその母枝の着生総枝数(TN&(S))に加算した。この計算手法により、ループを終えると、全ての枝の着生総枝数が計算

できた。CACOASは果実データを直接扱わなかったが、配列変数値、樹種に特有な結果習性の固有知識および慣行摘果指針を活用して、枝の着生果実数を推定した。リンゴやナシでは、一部の短枝の頂芽が花芽になり、翌年、この枝(前年生枝)上に花叢を形成する。オウトウでは、一部新梢のいくつかの腋芽が花芽になり、翌年、この枝(前年生枝)上に花叢を形成する。カキは一部新梢に数個の腋花をつける。そこで、リンゴやナシでは、短枝由来の前年生枝総数に対する果実を付ける(あるいは残す)短枝由来の前年生枝数の割合(以下、結果母枝割合)、および、結果母枝当り着果数を任意に設定すれば、以下の計算により枝の着生果実数を推定できると考えた。リンゴの場合、結果母枝当り着果数を1とし、短枝と発育枝を区別する長さ(たとえば、15cm)以下、および切り返し歴が無い( $P\%(S) = 0$ )という条件を満たした前年生枝について、乱数を発生しながら、結果母枝割合(花の着生の有無、摘果および生理落果などから、たとえば、4分の1、つまり、0.25)より乱数値が小さいときに限り、その枝の着生果実数の配列変数( $F\%(S)$ )に1を代入した。この計算を全ての前年生枝について行った後に、枝齢が前年生から樹齢までの昇順ループの中に、枝番号が1から最大値までの昇順ループを設定して、子枝の着生果実数の配列変数( $F\%(s)$ )値をその母枝の着生果実数の配列変数( $F\%(S)$ )に加算した。このループを終えると、最終的に全枝の着生総果実数が計算できた。オウトウでも結果母枝当り着果数(この場合は1以上)と結果母枝割合を任意に設定すれば、短枝・発育枝の区別は必要なかったものの、基本的に同じアルゴリズムを用いることができる。カキでは結果母枝を結果枝(新梢)、結果母枝割合を結果枝割合、結果母枝当り着果数を結果枝当り着果数と読み替え、枝齢ループを当年生枝から始めるように変更すれば、基本的に同じアルゴリズムが使用できる。

上記の着生果実数( $F\%(S)$ )は枝の肥大大量推定に欠かせない(あるいはその可能性がある)ため、上記の固有知識を用いて計算した。しかし、これは、CACOAS内部データと無関係な樹体の栄養条件、摘果の程度などにも関係するとともに、上記のパラメータ値の設定次第で大きく変わるという欠点を有した。着果の潜在能力を示す指標として、リンゴおよびナシでは1樹あたりの短枝数(切り返しがなされていないという意味で有頂芽短枝数)、オウトウでは1樹あたりの前年生枝数、カキでは1樹あたりの新梢数を集計し、出力した。これらは新梢の

長さL (s) および繰り返し剪定の有無P% (s) を用いて簡単に算出できた。着果の潜在的能力にとどまるが、CACOAS内部データのみで算出できる長所があった。

剪定前と剪定後の新梢の傾斜角度および分岐角度の平均値と標準偏差は、該当する配列変数値に統計処理を施すサブルーチンプログラムにより計算した。

CACOASは、剪定処理中絶えず残存した新梢総長を計算し、今年残存すべき新梢総長に等しくなった瞬間に剪定処理を終了した。したがって、間引きするたびに、あるいは、切り返すたびに、残存した新梢総長から間引いた新梢長あるいは切り返した長さを差し引く演算を行った。同時に、剪定情報出力ステップに備えて、間引き方法の種類（無条件間引き、LAI調節のための追加間引き、新梢の各条件付き間引き）別の間引き回数、間引いた枝の種類（枝齡、新梢では発育枝か短枝）別本数、間引いた新梢の種類別長さ、切り返し回数および切り返し率を累計した。

### 3. パラメータ入手のための実験方法

各特性値の調査方法として、ノギス、巻尺、物差し、分度器、方位板などの用具による直接計測法、および、基準点セットとともに撮影した対象枝群の左右写真を室内で解析する立体写真測量法を用いた。本報に記したリングの‘ふじ’の場合、新梢の姿勢・形状の特性値については立体写真測量法、枝の直径推定に関連した特性値については直接計測法を用いた。特性値の種類は両者ともほぼ同じであったが、測定原理は全く異なった。

#### 1) 用具による枝の特性値の測定方法

基部直径と先端部直径はデジタルノギスで測定した。なお、こう配が急で歪んだ基部をもつ枝については最基部より約1 cm離して測定した。先端部には芽がつくのでこれを避けて計測した。短枝先端の多くは花芽になっているので計測が難しかったが、できるだけ枝部分の直径を計った。基部と先端部の2ヶ所の直径が測定しにくいときは1ヶ所のみ測定した。長さについては比較的短い枝では物差し、長い枝や湾曲した枝では巻尺で計測した。ただし、短枝の長さはデジタルノギスで測った。傾斜角度は錘つき分度器の底辺を枝の平均的な傾きに平行になるように当て、糸が分度器の中央線（90度線）となす角度を1度刻みで読み取り、枝先端部が上向きときは正、下向きときは負の符号をつけた。樹列方向を目安にして鉄パイプを南北方向に向けて地面に置き、これに平行になるように16方位の方位板を測定枝の真下に置き、

枝の先端方角を南から東まわりに読み取り、方位角度とした。湾曲した枝を弓と見なし、弓の弦に相当するように物差しをあてがい、弦の長さ（a）を測り、また、弓と弦との間の最大垂直距離（h）を物差しで測定し、公式（宮本敏雄・松田信、1964）により曲率半径Rを計算した（(18)式）。

$$R = (a^2 + 4h^2) / (8h) \quad (18)$$

なお、短枝では曲率半径の測定は困難なため計測せず、一定値（=100cm）を与えた。母枝の基部から数えた子枝の順番を数え、発生順番とした。母枝基部からの距離は巻尺で測った。分岐角度は母枝の先端部点、子枝の発生点、および子枝の弧のおおよその中間点の3点のなす角度を分度器で測った。中心部分をくりぬいた分度器のくりぬいた部分を母枝に垂直にあてがい、その分度器面上で子枝の発生方向と地軸方向となす角度を反時計針方向に読み取り、枝序角度とした。枝当たり着葉数や着果数を前年枝単位で調査記録した。次に、2年生以上の枝に着生した子枝、孫枝などの数を数えたとき、この記録を参照し、それぞれの枝の着葉総数や着果総数を集計した。

#### 2) 立体写真測量法による枝の特性値の計測方法

##### (1) 立体写真測量法

極めて軽量の立体写真撮影用基準点（GCP）セットを作製した。透明アクリル樹脂製の細いパイプを左右、前後および上下に配置するように組み立て、この上に合計7個の標識を分散して取り付け（第9図左）。さらに、枝に簡単に吊ることができるように2ヶ所にハンガーのフック部分を取り付けた。あらかじめ、中央標識（第9図左の○印）がxyz座標系の原点になるようにして、7個の標識の空間座標を室内で計測し、立体写真撮影用の基準点データファイルを作成した。落葉後、これを対象枝群のほぼ中央に垂直に吊るし、三脚を用いて左右写真を撮影した（第9図中および右）。この際、三脚を左右にずらしたときの水平距離を物差しで測った。基準点セットの中央標識が真正面になるようにしてから、中央標識に焦点を合わせ、レンズ部リング距離計で撮影距離を読み取った。三脚移動の水平距離でこの撮影距離を割った値を基線比とした。基線比が約7になるように三脚の位置を調整した。また、撮影のたびに、おおよその撮影方角（ここではカメラの方角）を計測した。カメラは市販カメラ（オリンパスOM40）で、焦点距離35mmの広角レンズとモノクロSSフィルムを使用した。フィルムを現像後、フィルムスキャナを用いて、取り込み解像度

を2400dpiにして、写真画像をパソコンに取り込んだ。次に、立体写真測量用ソフトウェア（アジア航測社、計測名人）を用いて標定解析を行い、単モデル法で標定計算を行った。偏位修正画像を作成後、ストリング計測法で、各枝の中心軸4点~14点および基部直径と先端部直径に関連した各2点の3次元座標を計測した。ストリング計測データから特性値を効率的に計算するためのプログラムを作成した（プログラム名：CACOASPARAMETER）。CACOASPARAMETER内のプログラム計算のアルゴリズムに対応して、ストリング計測の手順およびストリング名の命名方法は以下のように設定した。リンゴ‘ふじ’の特性値は2年生枝上における前年生枝総数、前年生枝の発生順番、2年生枝基部からの距離、分岐角度、基部直径、先端部直径、長さ、傾斜角度、方位角度、曲率半径および枝序角度、および前年生枝上における新梢総数、新梢の発生順番、前年生枝基部からの距離、分岐角度、基部直径、先端部直径、長さ、傾斜角度、方位角度、曲率半径および枝序角度から構成された。したがって、母枝、子枝、孫枝の関係にある1本の2年生枝、1本の前年生枝および数本の新梢を1組の計測対象枝グループとして、写真画像内から選んだ。計測の手順は、1組の計測対象枝グループにおいて、2年生枝→前年生枝→新梢→新梢…の順であった。また、それぞれの枝において、基部から先端部に向かった中心軸上の数点→基部直径に関連した2点→先端部直径に関連した2点の順であった。計測名人は、ストリング名に続いてx座標、y座標およびz座標に並ぶ3個の数値データ行を連続的に出力した。そこで、ストリング名（8桁の数字・文字およびハイフン記号を

はさんで2桁の数字を加えたもの）に工夫を凝らし、CACOASPARAMETERがこのストリング名を解読できるようにした。ただし、ハイフン記号に続く2桁のストリング点読み取り番号はソフトウェアが自動的に付けた。計測画面内のストリング計測の対象枝をよく観察しながら、ストリング名の8桁には、フィルム巻番号（1桁数字）、コマ番号（2桁数字）、前年生枝識別番号（1桁数字）、ストリング計測枝の枝齢（1桁数字）、その着生順番（2桁数字）、その計測部位（1文字）の順に、ストリング名記入場所に入力した。計測部位を識別する文字には、枝中心軸、基部の直径計測部および先端部直径計測部に異なる英文字を当てた。

#### (2) CACOASPARAMETERによる各特性値の計算

CACOASPARAMETERは立体写真測量からのエキスポータデータ（csvファイル）を1行ずつ読み、ストリング名から枝齢（2年生、前年生、当年生のいずれか）、対象枝の着生順番、その計測部および読み取り点番号を識別し、これに続くx座標値、y座標値およびz座標値を読み取った。さらに、上記の識別結果を用いて座標データを仕分けた。すなわち、2年生枝、前年生枝あるいは新梢のいずれかと中心軸、基部直径計測部および先端部直径計測部のいずれかをと組み合わせることで配列変数の種類を決め、この中に座標データを代入した。1本の新梢の全特性値計算に必要な数行のエキスポータデータの読み取りと仕分けが終わると、以下に記したアルゴリズムにより全特性値を計算し、1本の新梢につき1行のデータ（全特性値をカンマで区切ったデータ）としてファイル出力した。引き続き次の新梢に関連する最初のエキスポー

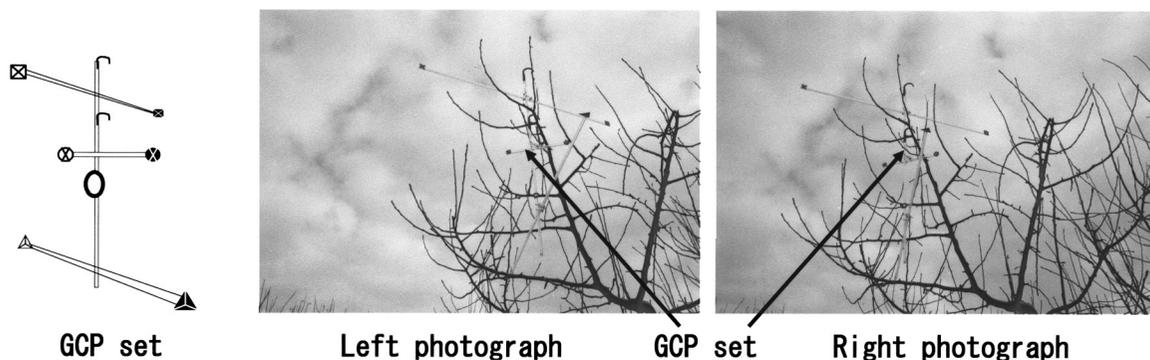


Fig.9. A schematic representation of an equipment of GCP set made of light pipes of transparent acrylic resin for stereophotogrammetry (left) and two photographs of apple ‘Fuji’ branches with the GCP set (middle and right).

トデータ行読み取り位置まで戻り、上記を繰り返した。なお、枝齢が異なっても特性値の計算手法は同じであったので、ここでは共通部分のみ記した。

発生順番はストリング名から直接解読した。基部直径あるいは先端部直径は、立体写真測量法の奥行き誤差の影響をできるだけ小さくするために、2個の計測点間の空間距離の代わりに平面距離（x座標とy座標だけで計算した距離）とした。枝の長さは中心軸7点に沿って、隣接した読み取り点の間の空間距離を積算した。分岐角度は空間内の2直線の交角として計算した。空間内の2点、 $P_{11}(x_{11}, y_{11}, z_{11})$ と $P_{12}(x_{12}, y_{12}, z_{12})$ を結ぶ直線と他の2点、 $P_{21}(x_{21}, y_{21}, z_{21})$ と $P_{22}(x_{22}, y_{22}, z_{22})$ を結ぶ直線とが交わるときの角度を $\theta$ とし、また、 $l_1 = x_{12} - x_{11}$ ,  $m_1 = y_{12} - y_{11}$ ,  $n_1 = z_{12} - z_{11}$ ,  $l_2 = x_{22} - x_{21}$ ,  $m_2 = y_{22} - y_{21}$ , および $n_2 = z_{22} - z_{21}$ としたうえで、(19)式を用いて $\theta$ を計算した(宮本・松田, 1964)。

$$\cos \theta = (l_1 l_2 + m_1 m_2 + n_1 n_2) / ((l_1^2 + m_1^2 + n_1^2)(l_2^2 + m_2^2 + n_2^2))^{0.5} \quad (19)$$

ただし、枝であるため、 $P_{12}$ および $P_{22}$ が、それぞれ、母枝の先端部側の点および子枝の先端部側の点とした。

傾斜角度と方位角度は2.の4)および5)に記した計算方法によった。なお、CACOASPARAMETERから出力した「方位角度」はカメラが基準点セットの中央標識を真正面に見たときのカメラの方角を「南」と仮定したうえで計算したので、実際のカメラの方角(南中から反時計針方向に測った)を上記の「方位角度」に加え、最終的な方位角度とした。したがって、一組の左右写真のエキスポートデータごとに、CACOASPARAMETERプログラム計算を行い、その都度カメラの方角を入力した。

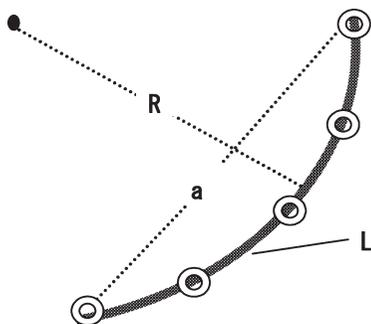


Fig.10. Radius of curvature (R) was calculated by the equation (20) using a length of an arc (L) and a length of the string (a) from stereophotogrammetric data.

曲率半径Rは、弧長L（枝上の各点を結ぶ折れ線の長さ）と弦長a（基部点と先端部点の間の空間距離）から、(20)式を用いて計算した(第10図)。なお、(20)式は公式と近似式(宮本敏雄・松田信行, 1964)を組み合わせて誘導したことから、Rは近似値であった。

$$R = (a^2/4 + 3(L^2 - a^2)/16) / (2(3(L^2 - a^2)/16)^{0.5}) \quad (20)$$

母枝の基部点から子枝発生点までの距離は途中の読取点を経由した距離であった。しかし、立体写真測量は計測誤差を伴うアナログ値であるため、母枝中心軸読み取り点を結ぶ折れ線上に子枝基部読み取り点が存在するとは必ずしもいえない。このため、以下の特殊な計算手法によった。すなわち、子枝基部読み取り点と母枝中心軸の各読み取り点との間の空間距離を計算し、その大小関係を比較し、最短距離にある母枝読み取り点の順番をNEAREST、2番目に短い距離にある母枝読み取り点の順番をNEARERとした(第11図)。(子枝基部読み取り点とNEARESTの点までの距離)/(子枝基部読み取り点とNEARERの点までの距離)の比率で、NEARESTの点とNEARERの点を結ぶ線分を分ける点を子枝発生点の推定位置とし、この点の空間座標を計算した。このうえで、母枝基部からこの点までの母枝の各読み取り点を経由した距離を計算した。

CACOAS内では新梢の枝序角度を推定せず、第1枝については乱数を利用して与え、第2枝以降はその位相を加えて計算した。一方、CACOAS内で多くの特性値を推定する際の説明変数として、枝序角度値から派生した枝序天頂角度を用いた(2の1)を参照)。したがって、重回

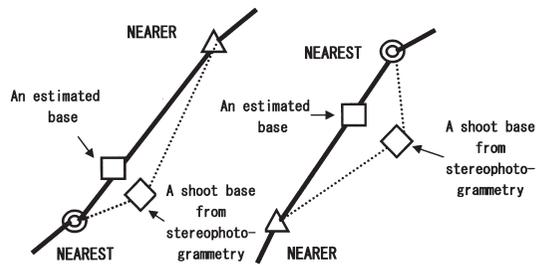


Fig.11. NEAREST shows the nearest point on the biennial branch to the shoot base from stereophotogrammetric data. NEARER shows the nearer point. The basal point of the shoot on the biennial branch was estimated using the ratio of (distance to NEAREST from the shoot base)/(distance to NEARER from that).

帰式を作成するに当り、枝序角度も調査する必要があった。第12図では、前年生枝から新梢が分岐する点をB点、前年生枝に沿った線分(AB)に垂直な平面を平面 $\Psi$ 、新梢基基点と弧の中間点を結ぶ線分をBC、線分ABとyz平面がなす角度を $\theta$ とした。 $\theta$ を東回りに測ったのが方位角度DA、線分ABとzx平面がなす角度(正負値をもつ)が傾斜角度(IA)であった。さらに、BCの投影線をBDとし、平面 $\Psi$ 上にB点から地軸方向に直線(図中の矢印線)を引き、この直線とBDのなす角度を $\gamma$ とすれば、 $\gamma$ を反時計針方向に測ったものが枝序角度(RA)であった。この $\gamma$ の計算手順は以下に示す通りやや複雑であった。B

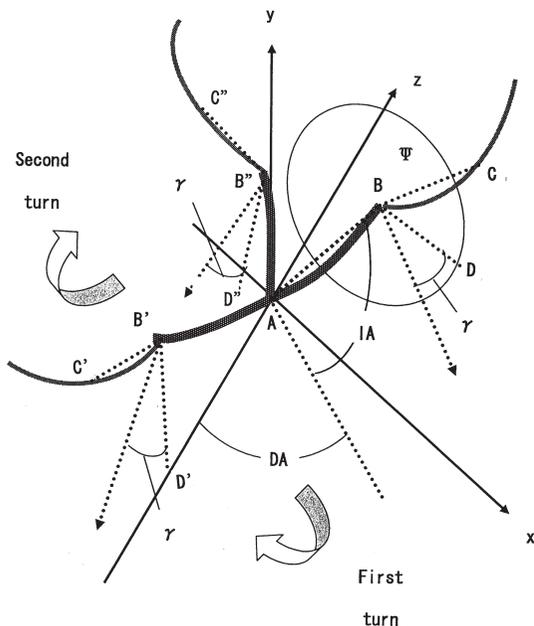


Fig.12. A method to calculate the rotation angle (RA) of a shoot from stereophotogrammetric data. A shoot grows with an angle  $\gamma$  from the earth direction (an arrow) on a cross section plane ( $\Psi$ ) of the biennial branch. The arc  $\overline{AB}$  and the arc  $\overline{BC}$  denotes a biennial branch and half of the shoot, respectively. The line  $\overline{B'C'}$  and the line  $\overline{B''C''}$  denotes the line formed by turning of the line  $\overline{BC}$  through  $\theta$  (DA of the biennial branch) round the y axis and that formed by turning the line  $\overline{B'C'}$  through  $\delta$  ( $=90-IA$ ) of the biennial branch round the x axis, respectively. The angle in which the line  $\overline{B''C''}$  crosses with the yz plane is equal to  $\gamma$ . RA is equal to  $\gamma$  when it is measured in the counterclockwise direction and smaller than 360 degrees.

点とC点の座標値(立体写真測量の座標系の座標値)を回転図形の一般公式の座標値に変換後(すなわち、z座標の符号を変え)、y軸を中心にy軸の正の方向を見ながら反時計針方向に $\theta$ 度回転した(B'点とC'点)。この回転処理後に再度、x軸を中心にx軸正の方向を見ながら反時計針方向に $\delta$ ( $=90-IA$ )度回転した(B''点とC''点)。回転後のB''C''とyz平面のなす角度を一般公式により求めれば $\gamma$ になった。CACOASPARAMETER内でこの計算を自動的に行うには、新梢の基基点(B点)と新梢の弧の中間点(C点)のz座標の符号を変えたうえで、すでにCACOASPARAMETERで計算された前年生枝の方位角度を $\theta$ とし、B点とC点についてx軸およびz軸については非回転、y軸を中心に $\theta$ 度回転するときの回転マトリクスを計算し、回転式でB'点とC'点の空間座標を計算した。この回転の結果得られた2点の空間座標について次の回転を行った。すでにCACOASPARAMETERで計算された前年生枝の傾斜角度をIAとし、z軸およびy軸については非回転、x軸を中心に $\delta$ ( $=90-IA$ )度だけ回転したときの回転マトリクスを計算し、回転式でB''点とC''点の空間座標を計算した。B''点の空間座標を $X_1, Y_1$ および $Z_1$ 、C''点の空間座標を $X_2, Y_2$ および $Z_2$ とし、直線B''C''がzy平面となす角度を、空間内を走る直線と平面のなす角度の一般公式(宮本・松田, 1964)にあてはめて計算し、 $\gamma$ とした。なお、RAは反時計針方向に表現せねばならないので、 $\gamma^* = \tan^{-1}(|X_1 - X_2| / |Z_1 - Z_2|)$ とおき、 $Z_1 > Z_2$ で $X_1 < X_2$ ならば $RA = \gamma^*$ 、 $Z_1 < Z_2$ で $X_1 < X_2$ ならば $RA = 180 - \gamma^*$ 、 $Z_1 < Z_2$ で $X_1 > X_2$ ならば $RA = \gamma^* + 180$ 、 $Z_1 > Z_2$ で $X_1 > X_2$ ならば $RA = 360 - \gamma^*$ とした。

### 3) リンゴ‘ふじ’における枝の年肥大量の推定パラメータの入手方法

17年生のマルバカイドウ台‘ふじ’2本を用いて、新梢から10年生枝までの枝各6本を用い、9月に1)に記した用具を用いた方法で各特性値を計測した。計測した特性値のうち、基部直径あるいは先端部直径を目的変数、これ以外の特性値、その2乗値および3乗値を説明変数として、SASのREGプロシジャのSTEPWISE法で重回帰分析を行った。

### 4) リンゴ‘ふじ’における新梢特性値の推定パラメータの入手方法

21年生のマルバカイドウ台‘ふじ’4本を用いて、12月下旬に、2)の(1)に記した方法で約100組の枝群の写真撮影を行った。左右の写真組につき、写真内の基準点セット付近の前年生枝を1~3本を選び、その母枝の2

年生枝および子枝に相当する全ての新梢を対象に立体写真測量を行った。次に、2)の(2)に記した方法(CACOASPARAMETER)により特性値のプログラム計算を行った。立体写真測量上の明らかな誤測定と判断されたものを除き、最終的に約1200本の新梢に関連した特性値群データ行を入手した。そして、目的変数を取り替えながら(具体的には結果を参照)、これに関連した特性値、その2乗値および3乗値を説明変数として、SASのREGプロシジャのSTEPWISE法で重回帰分析を行った。

#### 5) リンゴ‘ふじ’の5つの樹形に関するCACOASの性能試験(実験1)

剪定条件を同じにして、骨格枝の配置を大きく変えることで、開心形(open center)、Y字形(Y shape)、細形主幹形(slender central leader)、トレリス誘引仕立て(training by trellis)および変則主幹形(modified central leader)の5つの樹形を構築し、全ての樹冠情報、制限面積当りLAI(LAI<sub>la</sub>)や園地当りLAI(LAI<sub>o</sub>)、剪定情報および光環境としての12時および1日当りの平均葉

面PPFを比較した。

5つの樹形とも以下の項目についてはいずれも同じ条件にした(第2表下段)。すなわち、分岐角度のみ重回帰推定法にモンテカルロシミュレーションを加味した方法で推定し、他の特性値は重回帰推定法を用いた。樹列方向は南北、グリッド分割数は21、制限樹高は3.5m、新梢の枝序角度の位相は144度とした。1.の11)に記した式で計算した総長暫定値に係数0.7を乗じ、主枝総長と亜主枝総長とした。主枝長分布、主枝分岐角度分布、主枝発生間隔分布および亜主枝発生間隔分布はいずれも均等分布とした。第1亜主枝の枝序角度はいずれも90度とした。隣接新梢除去を2本おき、傾斜角度間引きの条件は+50度以上と-50度以下、分岐角度間引きの条件は40度以内とした。また、短枝には15cm以下の新梢を当てた。また、LAI調節のための追加間引き割合は、前年生枝、2年生枝、3年生枝、4年生枝、5年生枝および6年生枝の順にそれぞれ、30%、20%、10%、6%、4%および2%とした。切り返し率は延長枝の元枝が主幹の場合0.55、

Table 2. Constraints and pruning conditions used to construct the 5 types of tree shape in apple ‘Fuji’. The conditions not common to the 5 types of tree shape (top) and the common conditions (below).

Items	\Types of tree shape				
	Open center	Y shape	Slender central leader	Training by trellis	Modified central leader
Abbreviation of type of tree shape	OC	YS	SCL	TT	MCL
Tree width of north-south	4m	4m	3m	4m	4m
Tree width of east-west	4m	4m	3m	2m	4m
Length of trunk	100cm	80cm	250cm	240cm	150cm
Number of PSBs <sup>z</sup>	3	2	13	7	5
Number of SSBs <sup>y</sup> per PSB	3	5	2	2	3
Height of the first PSB from the soil surface	70cm	70cm	50cm	60cm	50cm
Distance of basal point of the first SSB from that of the PSB	20cm	20cm	10cm	20cm	20cm
Phase of rotation angle of PSB	120°	180°	144°	180°	144°
Direction of the first PSB	East	East	East	South	East
Tree space <sup>x</sup>	4m	4m	3m	4m	4m
Row space <sup>x</sup>	6m	6m	4.5m	3m	6m

The common conditions to the 5 types of tree shape

Row direction (south-north), tree height (3.5m), phase of rotation angle of SSB(180°), phase of rotation angle of shoot (144°), rotation angle of basal SSB (90°), range of inclination angle of shoot (-50° < and < 50°), range of branching angle of shoot (above 40°), interval of shoot thinning (2 shoots interval), branching angle distribution pattern of PSB (equal), distribution pattern of PSB length (equal), and bearing interval distribution of PSB (equal).

The maximum ratio (%) of additive thinning of 2, 3, 4, 5 and 6-year-old branches to regulate LAI<sub>la</sub> was 30, 20, 10, 6, 4 and 2% against each total number, respectively. The ratio of heading back of vegetative shoot having role of the extension of trunk, PSB, SSB, the oldest lateral branch, the next older lateral branch and the other younger branches was 0.55, 0.60, 0.65, 0.70, 0.75 and 0.8, respectively.

<sup>z</sup> Primary scaffold branch.

<sup>y</sup> Secondary scaffold branch.

<sup>x</sup> Used in OLEAS

主枝の場合0.6, 亜主枝の場合0.65, 最高齢の側枝の場合0.7, 次に高齢の側枝の場合0.75, これより若い枝の場合0.8とした。また, OLEASによる光環境解析の際には制限面積当りのLAIに調節処理を施した。

上記以外の項目については樹形に付随もしくは特有なものとして互いに異なる数値を設定した。すなわち, 南北樹幅制限, 東西樹幅制限, 主幹長, 主枝数, 主枝当り亜主枝数, 第1主枝の高さ, 第1亜主枝の各主枝基部からの距離, 主枝の枝序角度の位相, 亜主枝の枝序角度の位

相および第1主枝の発生方角については第2表上段に記したように一部異なった。また, OLEASによる光環境を比較するため, 園地当り葉面積指数 (LAI<sub>0</sub>) がほぼ等しくなるように栽植距離 (樹間距離と樹列間距離) を設定した (第2表上段)。

6) 同類の樹形における骨格枝の配置あるいは剪定条件を変えた場合のCACOASの性能試験 (実験2)

同類の樹形について, 骨格枝の配置あるいは剪定条件の微妙な違いがCACOASの出力結果にどのように現れるか試験した。

5) に記した開心形について, 新梢の条件間引きの条件を変えた場合 (第3表) のCACOASの出力結果を最終樹齢までの比較した。また, 5) に記した細形主幹形について, 主枝の分岐角度分布, 長さの分布, 発生間隔分布および主枝当り亜主枝数を変えた場合 (第3表) のCACOASの出力結果を最終樹齢までの比較した。

## 結 果

### 1. リンゴ‘ふじ’の枝直径の重回帰分析結果

枝の肥大処理 (第7ステップ) に必要な基部直径および先端部直径の推定パラメータ入手を目的とした重回帰分析結果を第4表に記した。基部直径 (DB (s)) と先端部直径 (DT (s)) はいずれも推定枝の枝齢 (A% (s)), 傾斜角度 (IA (s)), 枝序天頂角度 (TRA (s)) および長さ (L (s)) の値が大きいくほど, および, 推定枝の母枝の着生総果実数 (F% (S)) が多いほど太くなり, 反対に母枝が切り返されたときは細くなる傾向が認められた。基部直径の変動の約87%および先端部直径の変動の約88%が上記の変数で説明された (第4表)。当然ながら, 推定枝の枝齢と直径の間には密接な関係が認められ (第13図), 基部直径の変動の約76%, 先端部直径の変動の約69

Table 3. Varieties of the open center tree (OC in Table 2) by modifying thinning conditions and that of the slender central leader (SCL in Table 2) by modifying configuration of frame branches.

Items	Abbreviations	Modified contents
Inclination angle of vegetative shoots	OC11	-40° < and <40°
	OC12	-60° < and <60°
Branching angle of vegetative shoots	OC21	30° <
	OC22	50° <
Interval of shoot thinning	OC31	1
	OC32	0
Branching angle distribution pattern of PSB	SCL11	Acute for the top
	SCL12	Acute for the bottom
	SCL13	Obtuse in the middle
	SCL14	Acute in the middle
Distribution pattern of PSB length	SCL21	Long for the bottom
	SCL22	Long for the top
	SCL23	Long in the middle
	SCL24	Short in the middle
Bearing interval distribution of PSB	SCL31	Long for the bottom
	SCL32	Long for the top
Number of SSBs per PSB	SCL41	1
	SCL42	3

Table 4. Coefficients of variables (R<sup>2</sup>), residue (Re), F value (F) and the multiple regression formula of the basal diameter of a branch of apple ‘Fuji’ (upper) and that of the terminal diameter (lower) using several variables of the branch (index : s) and the parent branch (index : S) shown in Table 1 and their powers. The unit of the variables except diameter was same as Table 1. The unit of diameter, here, was mm. The number of the observations was 60.

R <sup>2</sup>	Re	F	Significance <sup>2</sup>	Formulas
86.77%	5.69	55.73	P<0.0001	DB(s)=4.045A%(s)-2.976P%(S)+0.1169IA(s)+0.403F%(S) +0.000002661ZRA(s) <sup>3</sup> +0.0006552L(s) <sup>3</sup> -1.387
87.67%	4.99	60.43	P<0.0001	DT(s)=3.488A%(s)-2.677P%(S)+0.1030IA(s)+0.6115F%(S) +0.000001803ZRA(s) <sup>3</sup> +0.00002901L(s) <sup>3</sup> -1.290

<sup>2</sup> By F-test

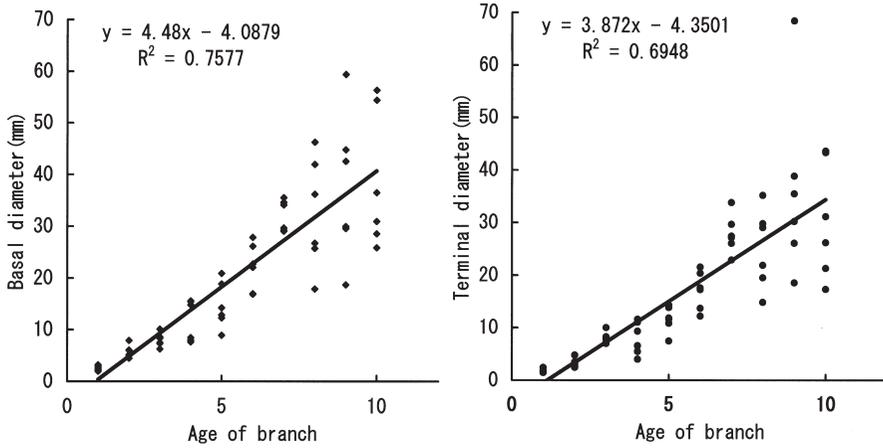


Fig. 13. The relationships between the branch ages and the basal diameters (left) or that of the terminal ones (right) in the apple 'Fuji' trees.

Table 5. Coefficients of variables ( $R^2$ ), residue (Re), F value (F) and the multiple regression formula of the each shoot variables of apple 'Fuji' using all variables of the parent branch (biennial branch, index : S) and the part of variables of the shoot (index : s) shown in Table 1 and their powers. The units of the variables were same as Table 1. The number of the observations was 1267.

$R^2 = 80.83\%$ Re= 1.027 F= 327.1 $P < 0.0001$	$SN\%(s) = -0.05674N\%(S)^2 + 0.008554N\%(S)^3 + 0.1330SN\%(B(S))^2 - 0.0144SN\%(S)^3 + 0.007724BA(S) - 0.08649DA(S)^3 + 0.03948R(S) - 0.0006010R(S)^2 + 0.000002530R(S)^3 + 0.1492L(S) - 0.00001438L(S)^3 - 0.0052151A(S) + 0.0001832IA(S)^2 + 0.000001922IA(S)^3 + 0.00000007(N\%(S)/SN\%(S))^3 - 1.601$
$R^2 = 80.43\%$ Re= 5.253 F= 426.6 $P < 0.0001$	$DIS(s) = 0.3725N\%(S) + 0.002781DA(S) + 0.7173L(S) - 0.002326L(S)^2 - 0.00000019(2.817e^{2.069N\%(S)/SN\%(B(S))})^3 + 5.855SN\%(S) - 1.053SN\%(S)^2 + 0.06435SN\%(S)^3 + 279.2(N\%(s)/SN\%(S)) - 332.1(N\%(s)/SN\%(S))^2 + 471.8(N\%(s)/SN\%(s))^3 - 1.376(2.073e^{2.641N\%(s)/SN\%(S)}) - 21.25$
$R^2 = 30.73\%$ Re= 33.84 F= 55.53 $P < 0.0001$	$BA(s) = -0.01486N\%(S)^3 + 0.000003210BA(S)^3 + 2.031BD(S)^3 - 1.394R(S) + 0.02191R(S)^2 - 0.00009731R(S)^3 + 10.44SN\%(S) - 0.6819SN\%(S)^2 - 0.13(2.073e^{2.641N\%(s)/SN\%(S)}) + 0.00000001021(1.257e^{4.495N\%(S)/SN\%(B(S))N\%(s)/SN\%(S)})^3 + 63.88$
$R^2 = 66.79\%$ Re= 21.09 F= 156.0 $P < 0.0001$	$L(s) = 0.2269SN\%(B(S))^2 + 5.953BD(S) + 3.298TD(S)^2 + 2.472L(S) - 0.06816L(S)^2 + 0.0005364L(S)^3 + 0.1039IA(S) - 7.999SN\%(S) + 0.5710SN\%(S)^2 + 12.31(N\%(s)/SN\%(S))^3 + 70.76(N\%(S)/SN\%(B(S))N\%(s)/SN\%(S))^2 + 1.288BD(s) - 0.05299BD(s)^2 + 0.0006302BD(s)^3 - 0.07866ZRA(s) + 0.000002701ZRA(s)^3 - 16.37$
$R^2 = 43.47\%$ Re= 0.294 F= 137.3 $P < 0.0001$	$DB(s) = 0.09629DB(S) + 0.03212DT(S)^3 - 0.000007342R(S)^2 - 0.001724SN\%(S)^2 + 0.000000001002(1.257e^{4.495N\%(S)/SN\%(B(S))N\%(s)/SN\%(S)})^3 + 0.00000002032BA(s)^3 + 0.006132L(s) + 0.3436$
$R^2 = 13.29\%$ Re= 0.181 F= 21.26 $P < 0.0001$	$DT(s) = -0.008951SN\%(B(S)) - 0.08911DT(S)^2 + 0.08814DT(S)^3 + 0.0009312IA(S) - 0.06369N\%(S)/SN\%(B(S))N\%(s)/SN\%(S) + 0.00000002055L(S)^3 + 0.5422DB(s) - 0.3461DB(s)^2 + 0.07706DB(s)^3 + 0.2429$
$R^2 = 29.98\%$ Re= 19.82 F= 48.51 $P < 0.0001$	$R(s) = -0.0002825BA(S)^2 + 0.1248IA(S) - 0.00003448IA(S)^3 + 0.00004318DIS(s)^3 - 0.0000006427ZRA(S)^3 - 0.03976BA(s) + 5.248N\%(S)/SN\%(B(S))N\%(s)/SN\%(S) + 1.144L(s) - 0.01487L(s)^2 + 0.00005872L(s)^3 - 3.685DT(s)^3 + 2.798$

<sup>z</sup> By F-test

%が枝齢だけで説明された。残りの変数で前者の約11%、後者の約19%が説明されたことになる。すなわち、枝の直径は大部分が枝齢で決まるが、同齢の枝でも母枝の上部（背部）から発生し、傾斜が急で、長いほど、および果実が多く着生するほど若干太くなる傾向が存在した。なお、2つの重回帰式はいずれも有意であり、また、全ての偏回帰係数の有意水準はSAS標準（ $P < 0.15$ ）を満たした。

## 2. リンゴ‘ふじ’の新梢特性値の重回帰分析結果

新梢の形状・姿勢の推定（第4ステップ）に関連したパラメータ入手を目的とする重回帰分析結果を第5表に記した。なお、重回帰分析に入る前に、観察結果を用いて、リンゴ‘ふじ’の新梢特性値の多くに密接に関係する頂芽優勢性の要因を解析した。その結果、前年生枝上先端側の新梢ほど太く、長い傾向が認められたので、前年生枝当たり新梢総数（SN%（S））に対する新梢発生順番（N%（s））の割合（以下、優勢度1, Dominance 1）を要因の1つに取り上げた。さらに、前年に頂芽優勢性の強かった新梢が次の年に母枝となった場合は、頂芽優勢性の弱かったものに比べ、子枝（新梢）の生長量も大きい傾向が推察された。そこで、2年生枝当たり前年生枝総数（SN%（B（S）））に対する前年生枝発生順番（N%（S））の割合（以下、優勢度2, Dominance 2）をもう

1つの要因に取り上げた。新梢の生長量の違いの多くはこの2つ（優勢度1および優勢度2）、あるいは複数の優勢度が様々組み合わせられて現れるものと考えた。たとえば、この2つの優勢度の数値がいずれも大きい場合、すなわち、2年生枝上先端側の前年生枝から発生した新梢のうち先端側のものほど一層優勢になり、逆に両者とも基部側の場合は極めて弱くなる。そこで、第3の要因として上記2つの優勢度の交互作用項（優勢度1×優勢度2）、すなわち、新梢総数に対する新梢発生順番の割合と前年生枝総数に対する前年生枝発生順番の割合の積（ $N\%(s)N\%(S)/(SN\%(S)SN\%(B(S)))$ ）を取り上げた（以下、優勢度3, Dominance 3）。また、頂芽優勢性の強いリンゴでは、上記優勢度の数値の増大に伴って、新梢生長量は直線的というよりも曲線的に増したので（第14および15図左）、これらの優勢度を用いた新梢長の指数近似値も取り上げた。縦軸に新梢長を取り、横軸に上記の3種の優勢度をとった散布図（第14および15図左）からの新梢長の指数近似値は、それぞれ、 $2.0733e^{2.64162N\%(s)/SN\%(S)}$ 、 $2.8175e^{2.0988N\%(S)/SN\%(B(S))}$  および  $1.2572e^{4.495N\%(s)/SN\%(S)SN\%(B(S))}$  であった（以下、それぞれ、優勢度1指数近似値、優勢度2指数近似値および優勢度3指数近似値）。これら6個の数値は、いずれも、第1表に記した配列変数を用いて作成できたので、以下の重回帰分析の説明変数に加えた。前年生枝当たり新梢発生数（SN%（S））と前年生枝

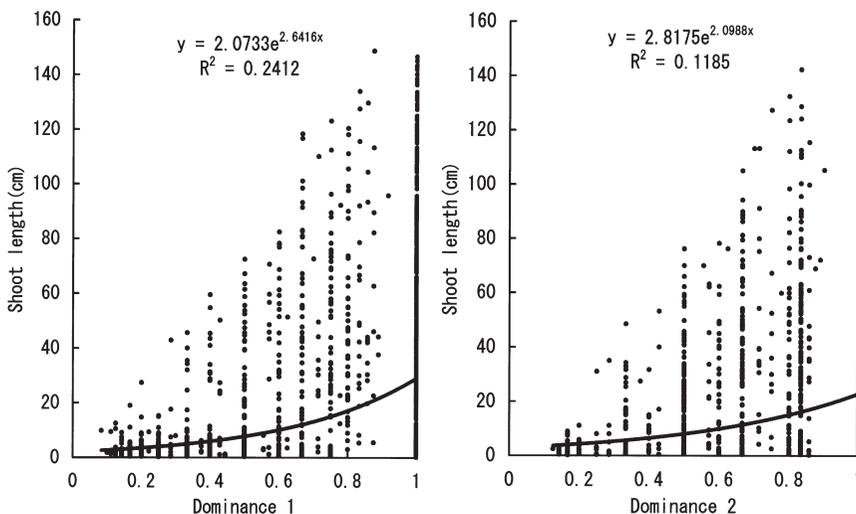


Fig. 14. The relationships between the shoot length and the dominance 1 (=  $N\%(s)/SN\%(S)$ ) in the apple ‘Fuji’ trees (left). The relationships between the shoot length and the dominance 2 (=  $N\%(S)/SN\%(B(S))$ ) (right).

長 (L (S)) の間には  $r=0.8517$  の高い正の相関関係が存在したため (第16図左), 説明変数に前年生枝の特性値だけを用いた場合の寄与率は約81%であった (第5表). このSN% (S) と前年生枝の全特性値を用いて新梢発生点の前年生枝基部からの距離 (DIS (s)) を重回帰分析

したところ, 発生順番 (N% (s)) との間に  $r=0.7228$  の高い正の相関が認められ (第16図右), このほか前年生枝の長さ (L (S)) や優勢度1などを含む多くの変数が取り込まれ, 寄与率は約80%であった (第5表). このDIS (s) を新たに加え, 新梢の分岐角度BA (s) を重回帰

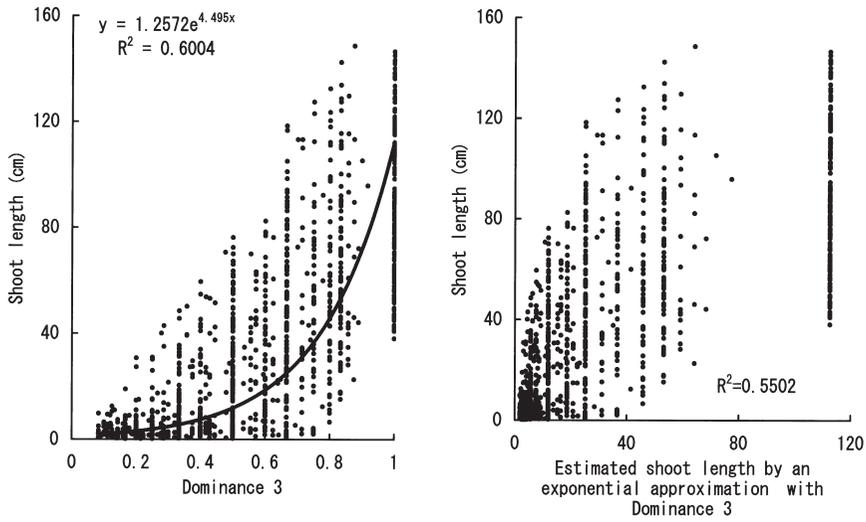


Fig. 15. The relationships between the shoot length and the dominance 3 (=N% (s) N% (S) / (SN% (S) SN% (B (S)))) in the apple 'Fuji' trees (left). The relationships between the shoot length and the estimated shoot length by the exponential approximation with the dominance 3 (right).

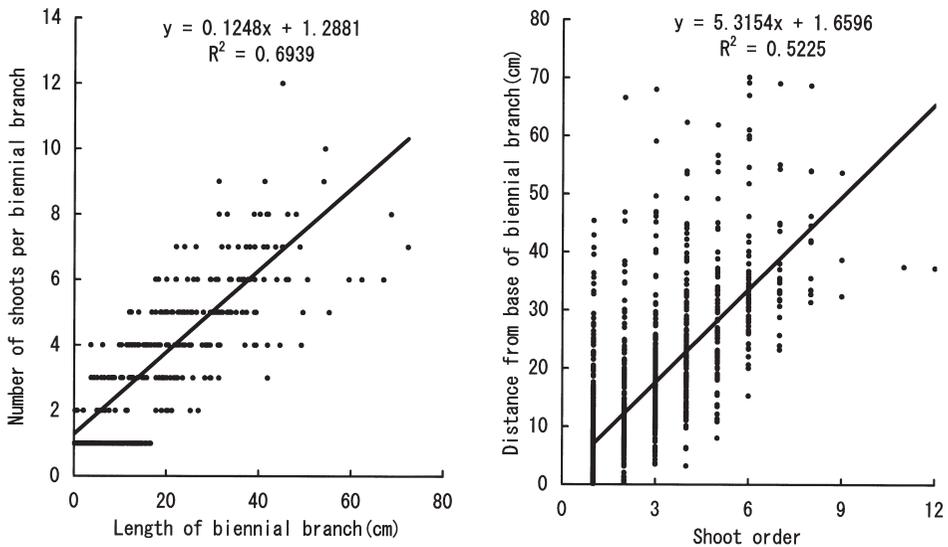


Fig. 16. The relationships between the number of shoots per biennial branch and the length of the biennial branch in the apple 'Fuji' trees (left). The relationships between the distance from base of the biennial branch and the shoot order (right).

分析したところ、優勢度1指数近似値などが取り込まれ、寄与率はさほど高くなく、約31%であった（第5表）。このBA (s) を新たに加え、新梢の長さ (L (s)) を重回帰分析したところ、優勢度3などの多くの変数が取り込まれ、寄与率は約67%であった（第5表）。このL (s) を新たに加え、新梢の基部直径 (DB (s)) を重回帰分析したところ、新梢長、優勢度3などの多くの変数が取り込まれ、寄与率は約43%であった（第5表）。ただし、このDB (s) を新たに加え、新梢の先端部直径 (DT (s)) を重回帰分析したところ、寄与率は低く、約13%であった（第5表）。これは新梢先端部直径の変動幅が狭く、また、頂芽や先端部の変形により計測誤差が大きかったためであると考えられる。このDT (s) を新たに加え、新梢の曲率半径 (R (s)) を重回帰分析したところ、新梢長(L(s)) などの多くの変数が取り込まれ、寄与率は約30%であった（第5表）。なお、上記全ての重回帰式は有意であり、また、全ての偏回帰係数の有意水準はSAS標準を満たした。しかし、枝序角度 (RA (s)) の重回帰分析においては有意な重回帰式は得られなかった（省略）。

### 3. 計算所要時間、必要なハードウェア構成、出力データの性格およびその取り扱い方法

CACOASによる1樹形20年間の推定所要時間は、周波数2.5ギガヘルツの通常のパソコンでわずかに約45分であった。ただし、OLEASと組み合わせた解析では、OLEASの最小出力項目（数値データ）だけの場合でも約2時間を余計に要した。多数の配列変数を同時に主記憶上で使用するため、CPUは512MB以上が必要であった。また、多数の出力画像を保存するため、大容量の各種ディスク装置が必要であった。

CACOASからの出力数値データは分類され、似たもの同志を集めた複数のファイルに樹齢行とともに順次追加する形で出力されたので、全計算が終了した時点で、表計算ソフトなどで集計できた。樹冠形および剪定前と剪定後の樹形、ソリッドモデル図などの出力画像は視角度の数だけ保存できた。このほか、CACOASの計算過程の主たる中間的データを順次記憶する膨大な1つのファイルも作られ、デバグやシステム改良のときにファイル内容を詳細に検討することもできた。この他、葉や枝の空間分布データのファイルを全樹齢分保存した。OLEASによるグリッド各ブロック内の個葉の葉面PPF段階表示画像を保存した場合、全画像数は年数×時刻数×グリッド分割数×3（段と列）の数になったため、たとえば、

20年間では約12GBの保存容量を必要とし、かつ、計算所要時間も約7時間におよんだ。したがって、OLEASにより最初に葉面PPFの数値データだけを出力し（約2時間）、数値から判断して、必要な場合に限り、再度OLEASで葉面PPF段階表示画像を出力するのが効率的であった。この場合にも画像保存の樹齢指定が可能であった。

### 4. リンゴ‘ふじ’の5つの樹形の比較

以下の出力例はCACOASの性能試験に限定した結果であり、無限に近い骨格枝や剪定条件の選択数に比べれば極く一部であることをことわっておく。

樹齢10年目の開心形の剪定前樹形図（南面と上面）、樹冠形図（南面）、剪定後樹形図（南面）、ソリッドモデル図、作業空間図およびグリッドの段および列別の葉面PPF段階表示画像の1例を第17図（カラー図）に示した。CACOASプログラムの計算処理工程に沿った中間データファイルを精査した結果、プログラムは誤り無く稼動したことが確認できた（正確に言えば現時点でバグは未発見）、画面を拡大して樹形図を検討した結果、枝の連続性、分岐、太さ、葉群の配置などに不自然さは認められなかった。また、5つの樹形（第18図）にはそれぞれの特徴が確認できた。

5つの樹形の発育枝数、短枝数および新梢数は樹冠拡大期に急速に増大し、その後、樹高、面積、毎年のLAIa目標値の制限を受けて経年振動した（第19図A,BおよびC）。葉材比は制限面積に影響されながら、樹冠拡大期に上昇し、樹齢8年目にピークに達し、その後の葉量の調節と枝の肥大とが重なるため低下した（第19図D）。

5つの樹形の発育枝間引き数、短枝間引き数、太枝剪去に伴う新梢間引き数、分岐角度間引き数、傾斜角度間引き数および近接間引き数は新梢数や制限面積に影響されながらも、LAI調節機能により経年振動した（データ省略）。剪定後に残存した有頂芽短枝数は剪定前の短枝数からLAI調節のための太枝剪去に伴う消失分および近接間引き分が差し引かれたものであったが、制限面積に密接であるとともに、樹冠拡大期に増大し、間引きの影響を受けて経年振動し、樹形による違いは少なかった（データ省略）。平均切り返し率は5つの樹形とも同一の枝齢別切り返し率で剪定処理がなされたので（第2表）、ほぼ同一の数値の変化を示した（データ省略）。切り返し数は新梢数と制限面積に密接であった（データ省略）。CACOASの調節機能により、剪定前の樹高は5つの樹形とも目標値（350cm）付近を振動した。剪定前の東西樹

幅は第1主枝方角の取り方(第2主枝以降の方角もこれによって自動的に決まる)によって大きく影響を受け、Y字形は目標値(400cm)より大きく、変則主幹形では目標値(400cm)より小さくなる傾向があった(第20図B). 南北樹幅も同様に第1主枝方角の取り方によって大きく影響を受け、総じて目標値近辺あるいはこれ以下であった(第20図C). 5つの樹形とも剪定前では地面に届く新梢がしばしば発生した. しかし、樹冠底部制限高間引き処理によりこの新梢は無くなった(データ省略).

5つの樹形の樹冠下空間容積は制限面積の大小に影響されるとともに、樹齢9年以降は開心形とY字形で大きく、変則主幹形で漸減した(第21図A). 樹冠外周部空間容積は制限面積の大小に影響されるとともに、樹齢8年までは急減し、以降はほぼ一定になった(第21図C). 上記2つの合計値である作業空間容積は制限面積の大小に影響されるとともに、樹齢8年までは急減し、以降はほぼ一定になった(第21図D). なお、真の作業空間容積を求めるには樹間距離と樹列間距離の要素をこれに加えて

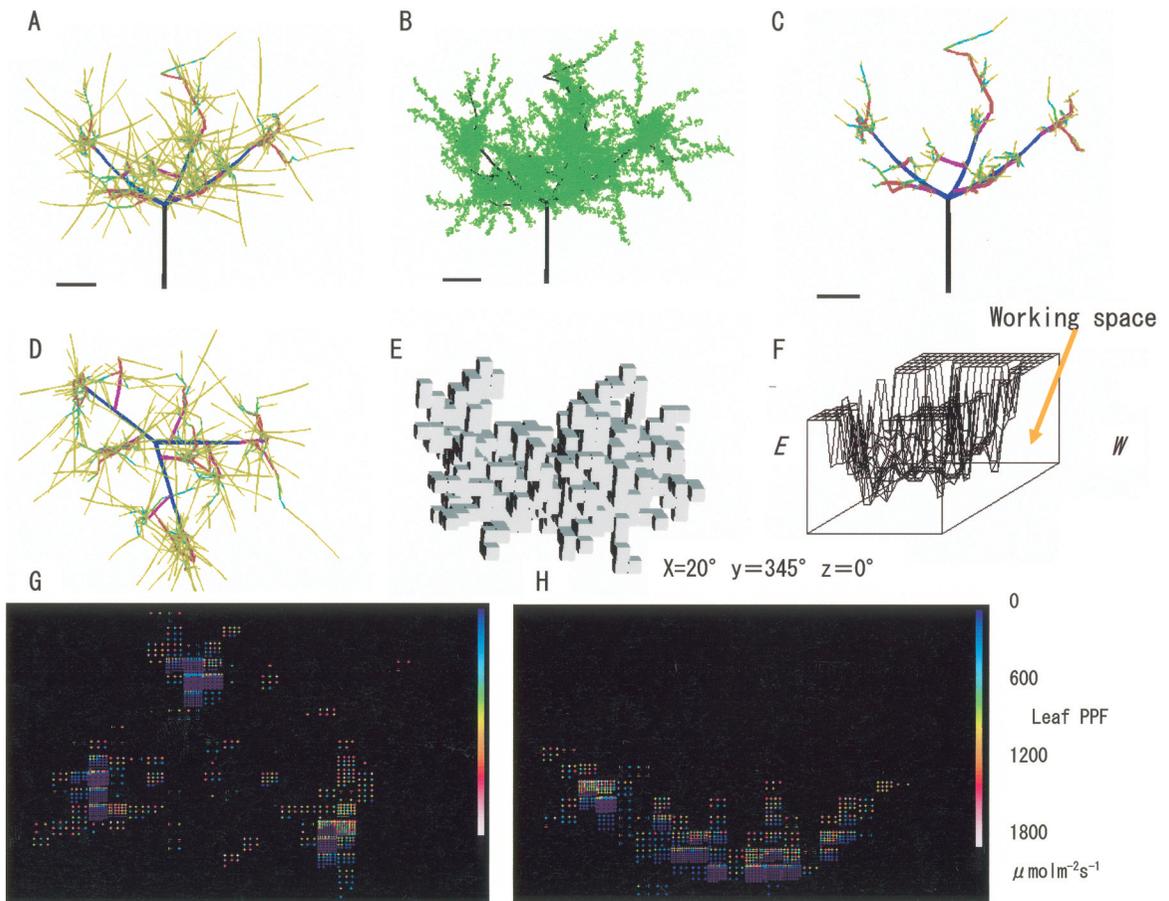


Fig. 17. Examples of graphic outputs of the open center tree of 10-year-old in Experiment 1. The horizontal line shows 50cm. A: The south view of tree form before pruning. B: The south view of tree crown form before pruning. C: The south view of tree form after pruning. D: The top view of tree form before pruning. E: The solid model of leaf layers shown by a block size in the grid with a rotation angle (each numerical symbol in the figure) around each coordinate axis. F: The solid display of working space under the tree crown within the limited area. G and H: Leaf PPF distribution displayed by colors and the color bar of 64 steps in the 12th stage from the top of the grid at 12 o'clock and that in the 12th row from the south, respectively.

計算せねばならない。

放置すれば増大する一方の葉量はCACOAS独自の調節機能によりほぼ調整された。LAIcはその計算原理から樹冠占有面積に大きく影響され、樹冠占有面積の著しく小さい初年度は大きく、2年目に急減し、以降、樹冠の拡大とともに上昇し、樹齢20年目には約5（細形主幹形と変則主幹形）から約3（他の3者）の範囲にあった（第22図A）。一方、調節前のLAIaは幼木期の細形主幹形で目標値より高かったが、以降は5つの樹形とも目標値付近をわずかに振動した（第22図B）。

LAIa調節機能を作動させて、樹冠形は変えないまま、5樹形とも等しいLAIaに変更した後に（第22図C）、さらに、5つの樹形の配植条件を変えることにより（第2表上段の樹間距離と樹列間距離を参照）、園地当たりLAIoがほぼ等しくなるようにして（第22図D）、OLEASにより光環境の経年変化を出力させた。なお、OLEASにおける樹間距離と樹列間距離の設定はグリッド分割の際のブロック1辺長の刻みを用いて行われるため、第2表上段の樹間距離と樹列間距離とは僅かに異なったが、5

つの樹形のLAIo値はほとんど同一であった（第22図D）。OLEASによる光環境の解析の結果、5つの樹形の12時平均葉面PPFは樹齢4年頃から8年目まで急減し（トレリス誘引仕立てがやや高い）、以降は漸減した（第22図E）。樹齢8年～14年の高低関係は開心形>他の4樹形、15年以降は総じて開心形>トレリス誘引仕立て=Y字形>変則主幹形>細形主幹形であった。ただし、これは12時間間値の比較であり、この中には樹形の立体的要因や時刻要因による影響が存在することは否定できない。5つの樹形の1日平均葉面PPFの樹齢8年以降の高低関係はトレリス誘引仕立て=開心形>他の3樹形であった（第22図F）。ただし、Y字形には明瞭な漸減傾向は見られず、最終的には3番目の水準になった。等しい園地LAIのもとで、トレリス誘引仕立ておよび開心形と他との間には1日平均葉面PPFで最大約 $50 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の差が生じ、この差は強光時間帯でもっと拡大したことになる。1日あるいは時刻別の葉面PPF分布、あるいはグリッド段別と列別の葉面PPF分布にも興味ある傾向が見られたが省略する。

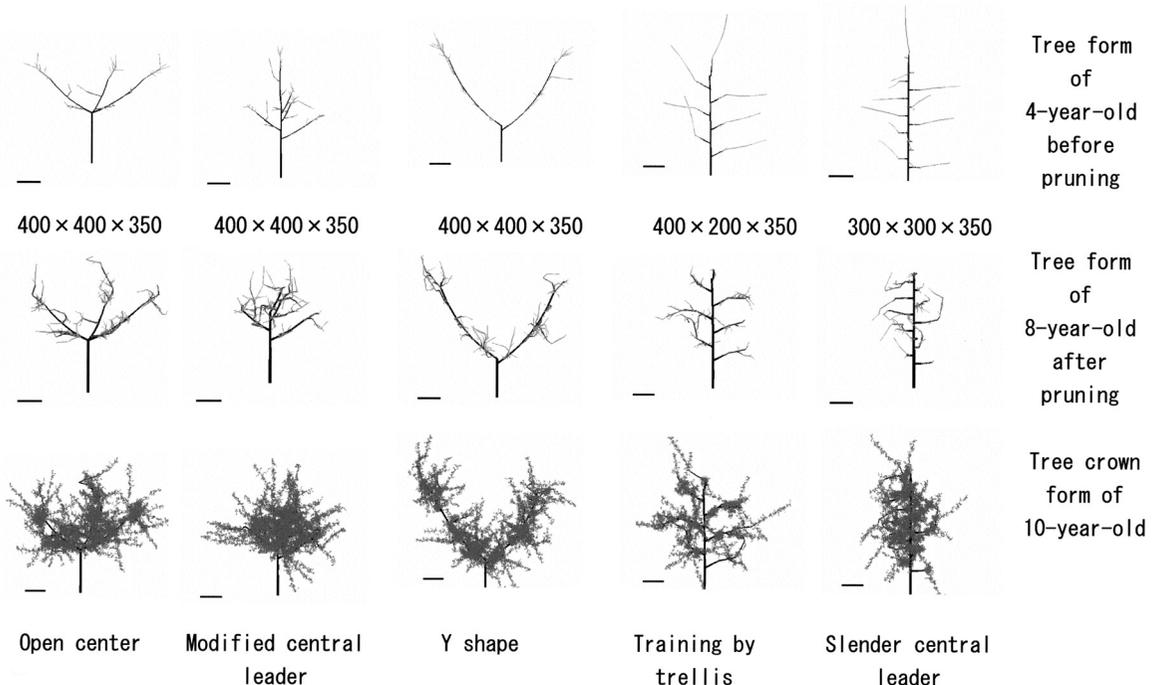


Fig. 18. Examples of graphic outputs of the 5 types of tree shape in Experiment 1. The horizontal line shows 50cm. The constraints and pruning conditions were refer to Table 2. The mathematical expression shows limited south-north width×limited east-west width×limited tree height (cm).

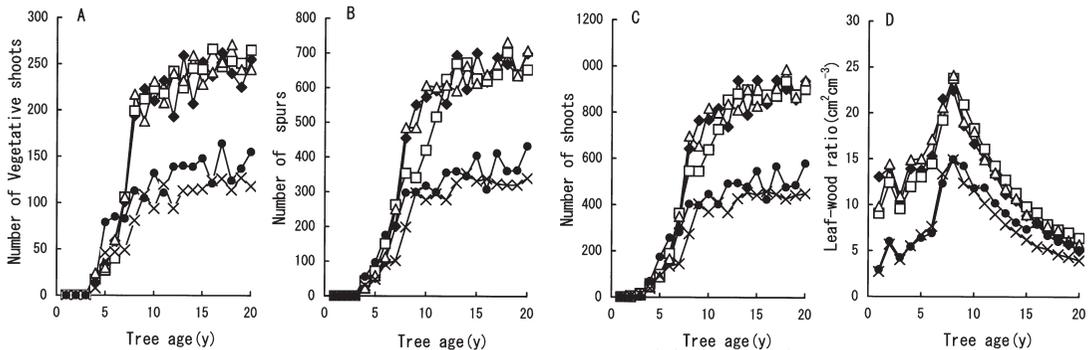


Fig. 19. Annual changes of total number of vegetative shoots (A), spurs (B) and all shoots (C) and that of leaf-wood ratio (D) of the five types of tree shape during 20 years in Experiment 1. ◆ : Open center, □ : Modified central leader, △ : Y shape, × : Training by trellis, ● : Slender central leader.

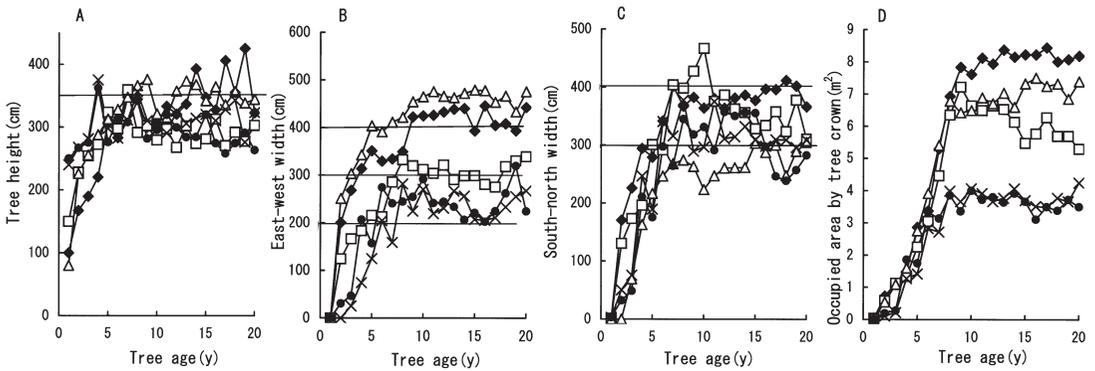


Fig. 20. Annual changes of tree height (A), east-west width (B), south-north width (C) and land area occupied by tree crown (D) of the five types of tree shape during 20 years in Experiment 1. Symbols of the figures refer to Fig.19. Cross bars indicate the limited values.

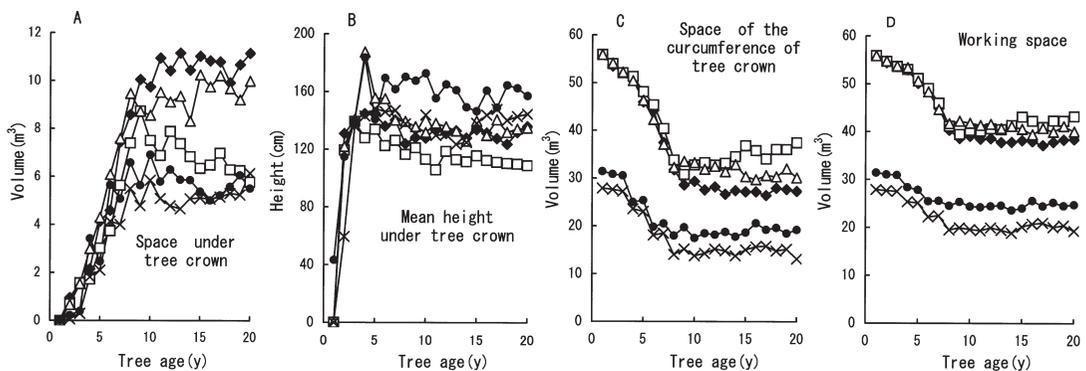


Fig. 21. Annual changes of space volume under tree crown (A), average height under tree crown (B), space volume of the circumference of tree crown (C) and working space volume (D) of the five types of tree shape during 20 years in Experiment 1. Symbols of the figures refer to Fig. 19.

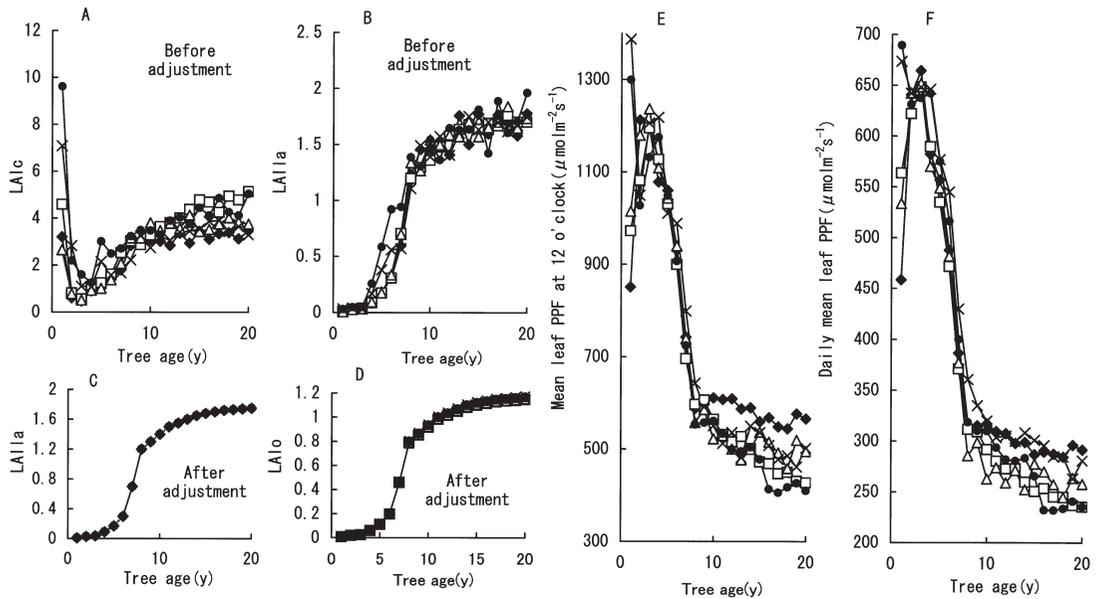


Fig. 22. Annual changes of LAIc before the adjustment (A), LAIla before the adjustment (B), LAIla after the adjustment (C), LAIlo after the adjustment (D), mean leaf PPF at 12 o'clock (E) and daily mean leaf PPF (F) of the five tree form types during 20 years in Experiment 1. Symbols of the figures refer to Fig.19.

##### 5. 同一の樹形における単一要因を変更することによる CACOAS出力結果

CACOASの性能を探るために、実験1の樹形を基準にして、開心形については幾つかの間引き剪定条件の中の単一要因を変えた場合、細形主幹形については主に骨格枝の配置の中の単一要因を変えた場合のCACOASの出力結果を示す。

###### 1) 開心形における間引き剪定条件の影響

間引き剪定に関する単一要因を変えた場合、開心形本来の樹形や樹冠形は大きく崩れず、樹高、樹幅、占有面積、作業空間容積には大きな違いは見られなかったが、細かい枝には必ずその影響が全て場合に現れた（データ省略）。当然のことながら、発育枝間引き数、短枝間引き数などは新梢数、枝齡別切り返し率、近接間引き間隔によりに影響を受けた（データ省略）。LAIcおよびLAIlaに対する単一要因の違いの影響は少なかった（第23図AおよびB）。ただし、近接間引き間隔が1本おきの場合には樹齡10年までLAIlaは目標値より低かった（第23図B）。この理由は発育枝数の不足により、(1)式による調整がなされないまま推移したことによる。OLEASにより5.と同様な方法で光環境を比較したところ、12時平均葉面

PPFおよび1日平均葉面PPFは樹齡12年以降、近接間引き間隔が1本おき(OC31)および分岐角度が $30^\circ$ 以下を間引く場合(OC21)は高く、傾斜角度が $-60^\circ$ 以下と $60^\circ$ 以上を間引く場合(OC12)は低い傾向が見られた（第23図CおよびD）。

###### 2) 細形主幹形における骨格枝配置の影響

骨格枝の配置条件の単一要因だけを変えた場合、たとえば樹齡6年目の樹形を比較すると同一の制限面積、ほぼ同一のLAIlaのもとでも微妙な樹形の違いが現れた（第24図）。新梢数、発育枝数、短枝数および残存有頂芽短枝数には一定の幅の経年振動が見られ、単一要因との関係は明らかでなかった（データ省略）。剪定前の樹高、東西樹幅および南北樹幅は目標値付近に調整された（第25図）。樹高には骨格枝の単一要因の違いによる影響が認められ、樹高は主枝分岐角度の分布型が下広上狭では高く、均等分布では低かった（第25図A）。東西樹幅および南北樹幅はそれぞれで経年振動が見られたが、単一要因との間にははっきりした傾向は認められなかった（第25図BおよびC）。太枝剪去に伴う間引き新梢数、発育枝間引き数、短枝間引き数および切り返し数にはそれぞれの経年振動が見られたが、単一要因との間にははっきり

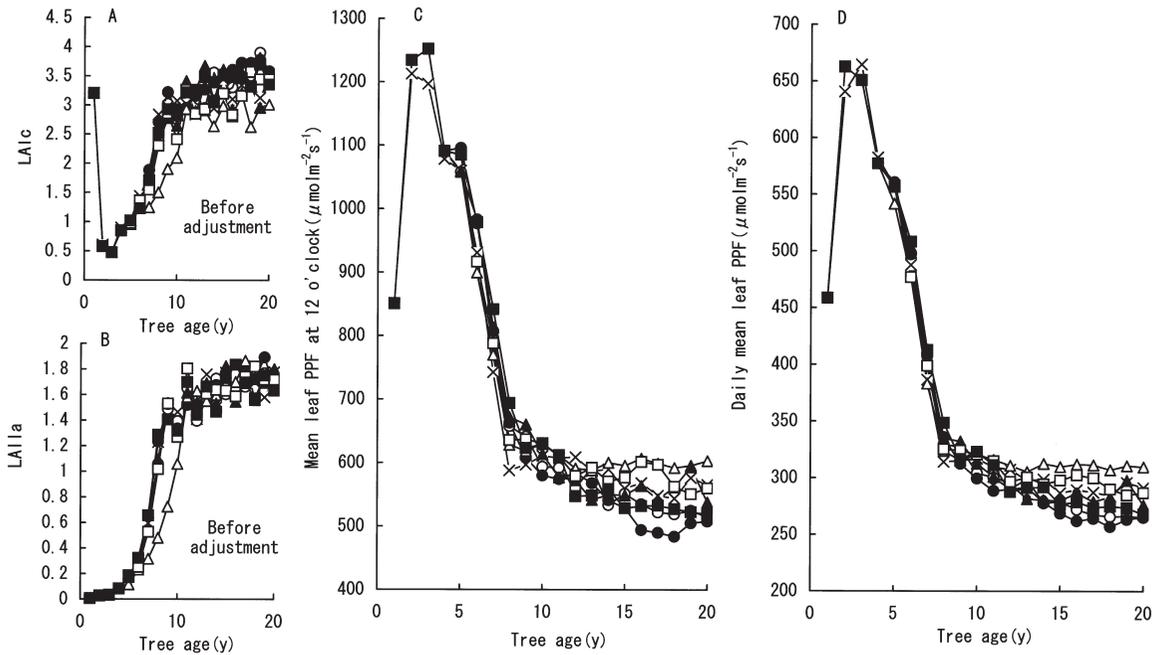


Fig. 23. Annual changes during 20 years of LAIc before the adjustment (A), LAIla before the adjustment (B), mean leaf PPF at 12 O'clock (C) and daily mean leaf PPF (D) of the 6 varieties of open center tree (seen in Table 3) when only single factor in thinning was modified from OC in Table 2 of Experiment 1. × : OC in Table 2, ○ : OC11, ● : OC12, □ : OC21, ■ : OC22, △ : OC31 and ▲ : OC32 in Table 3.

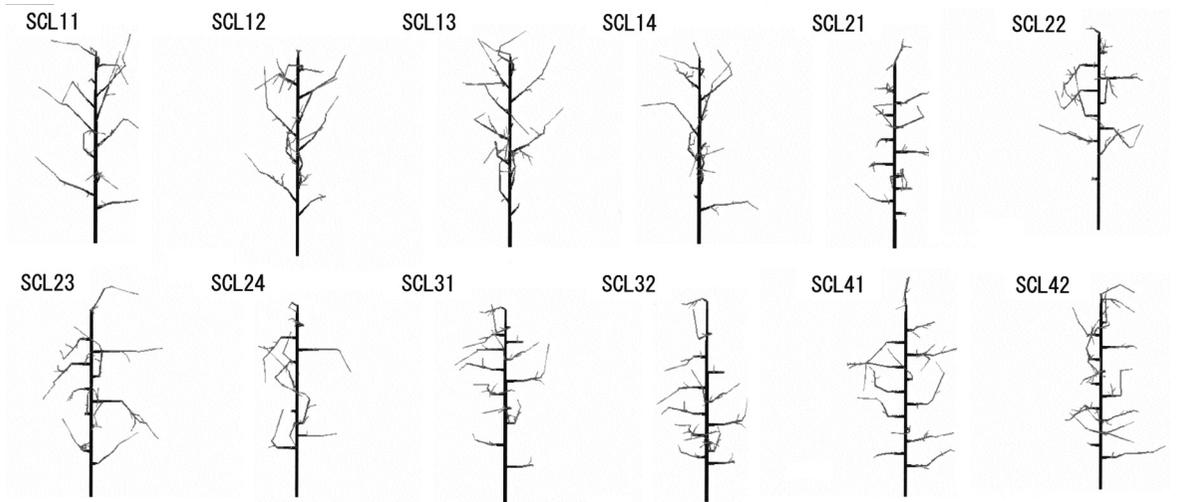


Fig. 24. Examples of graphic outputs of south view of the 12 varieties of tree form of 6-year-old before pruning of slender central leader when only single factor in configuration of frame branches was modified from SCL in Table 2 of Experiment 1. The horizontal line shows 50cm. The abbreviations refer to Table 3.

した傾向は認められなかった（データ省略）。LAIaはその目標値付近に調整された（第26図B）。OLEASにより5.と同様な方法で光環境を比較したところ、同じ園地

LAI (LAIo) にもかかわらず、細形主幹形の骨格枝の微妙な違いにより、光環境に大きな違いが見出された（第26図CおよびD）。樹齢4年以降、12時および1日の平均

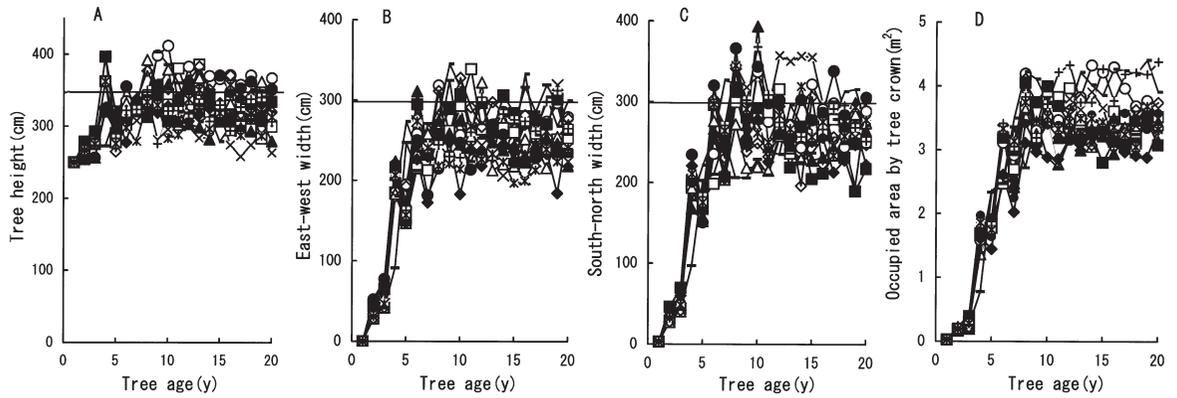


Fig. 25. Annual changes of tree height (A), east-west width (B), south-north width (C) and land area occupied by tree crown (D) of the 12 varieties of slender central leader during 20 years in Experiment 2.  $\times$ : SCL in Table 2,  $\circ$ : SCL11,  $\square$ : SCL12,  $\triangle$ : SCL13,  $\diamond$ : SCL14,  $\bullet$ : SCL21,  $\blacksquare$ : SCL22,  $\blacktriangle$ : SCL23,  $\blacklozenge$ : SCL24,  $+$ : SCL31,  $*$ : SCL32,  $-$ : SCL41 and  $-$ : SCL42 in Table 3. The cross lines indicate the limited values.

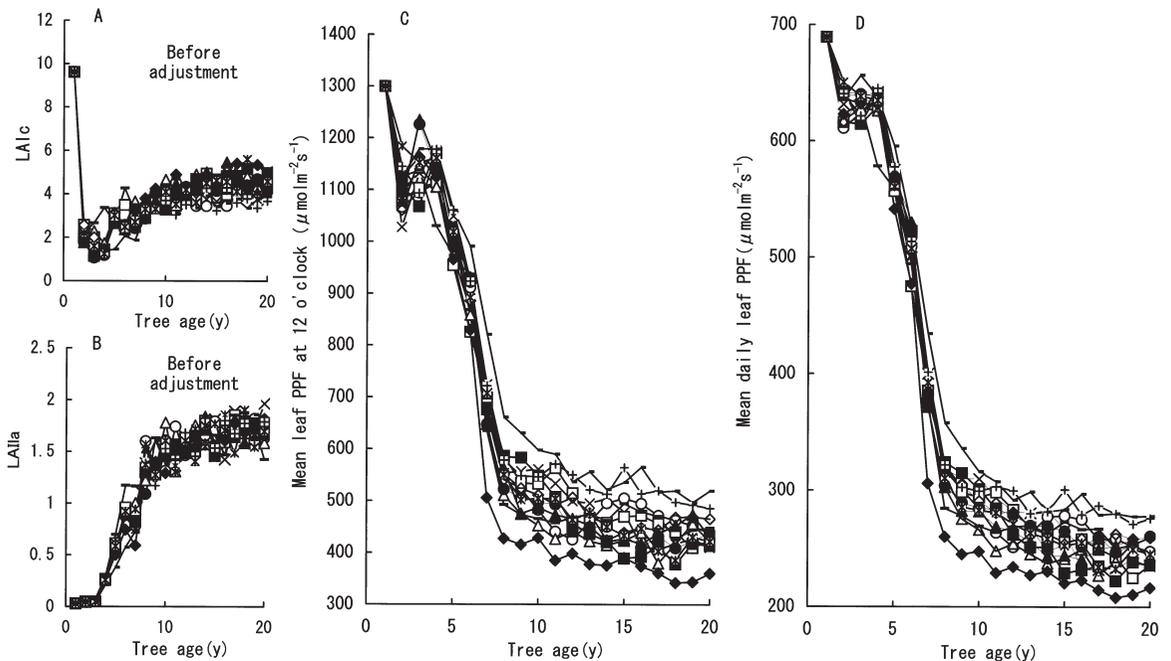


Fig. 26. Annual changes of LAIc before the adjustment (A), LAIa before the adjustment (B), mean leaf PPF at 12 o'clock (C) and daily mean leaf PPF (D) of the 12 varieties of slender central leader during 20 years in Experiment 2. Symbols of the figures refer to Fig. 25.

葉面PPFは垂主枝数が1本、主枝分岐角度分布が中広上下狭の場合が高く、反対に主枝長分布が中短上下長および主枝分岐角度分布が中広上下狭の場合が低かった(第26図CおよびD)。

## 考 察

樹形の開発あるいは整枝剪定方法に関する試験は、試験圃場面積が狭い、維持管理や調査労力の不足、調査方法が確立されていないなどの理由から、散発的で、樹形数や試験期間が限定されがちである。したがって、数十年にわたる調査ができず、個々の調査がおおまかになるため、試験成果を普及しても、成り行き任せの部分がある。どうしても現れ、生産農家からの注文や疑問が絶えない。最新の情報科学技術を駆使し、多様な樹形を構築し、長期にわたる詳細な樹冠情報や剪定情報を極く短時間のうちに入手できれば、これらを参考に試験設計することにより、樹形試験の質と効率を向上できると考えられる。

コンピュータグラフィックスによる樹木形の表現については、各種の手法が報告されているが(Fisher・Honda, 1979; 本田久夫, 1979; 林拙郎・高橋洋子, 1999; Prusinkiewicz, 1998)、果樹の樹形構築と樹冠情報の長期予測を目的にしたシステムはこれまでに国内外で報告されていない。しかし、開発したCACOASは万能ではないので、その機能を検討する前にCACOASの前提条件や背景にある基本理念を最初に記しておく。CACOASはコンピュータシミュレーションモデルであるため、極めて稀な事象や偶然性の結果としての多様性を無視し、ある程度機械的に処理せねばならなかった。すなわち、枝は枝齢が1年高い枝から発生し、枝は剪去したところから先に伸びない、突発枝は無視する、擬頂芽が存在してもパラメータから除外するなどであった。また、新梢の発生数、発生位置、太さ、分岐角度、最終伸長量の大部分は品種特有な植物生理的習性により決まり、この習性の多くは遺伝的なものであるとの考えに立った。したがって、対象品種について数多く観察し、その結果から算出したパラメータに全面的に依存した。このパラメータ収集は立体写真測量法とCACOASPARAMETERプログラムを使用することにより、用具を用いる方法に比べて各段に容易であった。したがって、上記方法により反復数を増やすことにより、パラメータの精度向上が期待できる。枝の肥大推定のためのパラメータは立体写真測量法では困難であり、用具を用いた方法で計測せねばならないが、枝齢と密接なため計測反復数は少なくても良いと思われる。

枝の発生は気象条件、土壌条件、雑草や病虫害、台木および栽培条件(施肥量、植調剤散布、摘葉、着果量など)によっても影響されるが、これらの要因をシステムに取り込むことは後に記す理由から当面避けた。したがって、現時点のCACOASは、栽培果樹の樹形や樹冠形が樹幅、樹高、LAIなどの制限に基づく枝の剪去作業ならびに母枝の姿勢・形状の影響を受けた新梢の姿勢・形状により大方決定され、太枝から小枝にいたる全ての枝が人工的産物(栽培果樹)になるという考えに立っている。また、樹形や樹冠形の経年変化は枝の剪去とこれによる新梢形質への影響の相互作用の植え付け当時から時系列的因果関係にあり、L-systemの考え方(緒言)とは本質的に異なるものと考えられる。

システムの計算原理と計算過程の精査、計算工程における数値データの妥当性や樹形画面の検討および実際の樹の葉層や枝の観察などの結果、CACOASプログラムは当初意図した通りの機能を有するものと思われた。CACOAS出力結果を実際の樹を用いて検証するには、CACOASで用いた条件通りの実際の樹を作り出すこと(さらに、全く同一の樹を一定距離間隔で栽植して光環境を実測すること)が物理的に不可能であることに加え、計測方法、計測労力、計測期間(数十年)などの理由から実質的に不可能である。さらに、CACOASの利用目的は実際の剪定における職人的な細かい技法まで含んだ樹を再現することではなく、樹形開発や剪定技術に参考になる長期かつ多数の樹冠情報を得ることである。現状では熟練者の直感的予想以外の予測手段は存在しない。4次元の世界の数量予測は、直感的予想の最も苦手な分野であるため、これはコンピュータに任せるのが得策であると考えられる。CACOASにおける骨格枝の配置の自由度、剪定条件の自由度、各種制限値の自由度を組み合わせると樹形構築・開発の自由度は著しく高まり、したがって、極めて多様な樹形の作成が可能になるものと思われる。さらに、CACOASの樹形シミュレーション、特に樹高や作業空間容積などを含む樹冠解析結果や光環境解析結果を比較することにより、緒言に記した低樹高化、光環境改善および機械化対応樹や作業空間の確保のための樹形開発に参考にできる情報を提供できることがわかった。

なお、方法で記したように、枝の湾曲を真円状とみなし、湾曲方向を地軸方向とみなした理由には以下の数点があげられる。すなわち、①曲率半径が小さく、かつ弧長が大きい場合、真円状と見なすことによる誤差は無視できないが、果樹枝の曲率半径は枝長に比較して大きい

ので、真円状と見なすことによる誤差は大きくならない、②枝の湾曲方向は、誘引作業のような特別の事情を除けば、たいてい地軸方向である、③急に曲がったり、水平方向に湾曲したように見えるのは、そこで枝齡が代わっているのを見逃したことが多い、などであった。

実際の剪定手順は太枝から小枝へ、間引きから切り返しの順序が一般的である(原田良平, 1978)。しかし、同じ間引きでも様々な観点からなされるので、整枝剪定の手順を厳密に定式化することは難しい。さらに、CACOASの目的には、慣行的な整枝剪定にとらわれず、樹形の開発を目的として、骨格枝の配置や各種の制約条件を変えた場合の剪定の中味やその影響に関する情報収集も含まれる。さらに、樹種によっては、芽のつき方、枝の伸び方、結果習性、頂芽優越性などが異なり、整枝剪定法も当然ながら異なる。したがって、CACOASにおける剪定ステップの工程を画一的に設定できず、目的や対象樹種によって弾力的に変えねばならないとともに、今後、さらに検討を要するものと思われる。

LAI調節のための追加間引き割合を設定する場合、高齢枝の間引き割合が高いと、骨格枝の乱れが顕著になり、反対に低いと、骨格枝の乱れが減少すると考えられる。CACOASの利用目的によっては、どちらが良いとは必ずしもいえない。なぜならば、栽培果樹は老木に見られるように骨格枝そのものの変遷(菊地, 1987)を伴うとともに、その原因が剪定作業(特に、太枝剪去)にあると筆者らは考えるからである。

最後にCACOASの今後の改良点および将来的展望に触れたい。通常のパソコンを用いて品種パラメータファイルの交換と数分のキーボード入力作業だけを行えば、間もなく結果が得られるので、目標であった敏速推定が達成できたものと考えられる。今後は樹形や剪定法の開発だけでなく、剪定の学習支援システムも兼ねる方向で改良する必要がある。今回は導入を控えた環境・栽培要因や樹齡による成長速度の変動要因はCACOAS開発当初から念頭を離れないものであった。しかし、これらを導入するための手法の選択肢の中には、膨大な量のパラメータ入手実験や固有知識を前提にする手法も含まれるので、プログラム骨格部分をひとまず完成することを優先した。他の選択肢の一つである環境・栽培条件や樹勢に対応した数段階の生長速度係数および樹齡に対応した単純な曲線状の生長速度係数を設定し、これらを新梢長推定値に乗ずる手法は、簡便で現時点でも可能である。

どちらにするか今後検討したい。さらに、CACOASからの作業空間容積データを栽培管理作業に関連付ける方法、枝の込み合い程度のデータの取り扱い、枝の機械的強度や車枝発生程度の解析方法および樹形図に着果部を表示する方法については現在検討中である。

## 謝 辞

本研究の一部は平成13~14年度文部科学省科学研究費補助金(萌芽研究, No.13876004)で実施した。記して謝意を表す。

## 摘 要

パソコンに樹形を構築させ、光環境改善、低樹高化、機械化対応などの樹管理方法を検討するのに必要な長期にわたる樹冠の諸情報を短時間に予測するための樹形構築解析システム(以下、CACOAS)を作成した。CACOASによる処理・計算は、パラメータ類の入力、骨格枝の配置の選択、制約条件や剪定条件の選択、新梢の形状・姿勢の推定とその空間座標の計算、剪定前の樹形図および樹冠形図の作図、仮想グリッドを用いた樹冠解析、全枝の肥大処理、年次別目標葉面積指数や樹高などの制約条件および剪定条件に対応した剪定処理、剪定後の樹形の作図、剪定の中味とその結果の集計および枝齡の繰り上げの合計11のステップからなり、最終樹齡までこのサイクルを繰り返した。なお、別システムの果樹園光環境解析システム(OLEAS)にデータを引き渡し、光環境の解析を可能にした。上記のサイクルを数十年にわたり繰り返したので、初年度から数えた新梢の発生順番(枝番号)を添字とする多くの配列変数を準備した。また、枝齡や母枝の枝番号を参照することによる多種多様な計算手法を考案し、プログラム中に用いた。新梢の特性値の推定には主に重回帰推定法、必要に応じてこれにモンテカルロシミュレーション法を組み合わせ用いた。このためのパラメータの入手には主に立体写真測量法を用いた。新梢の空間座標などの計算には空間解析幾何学を用いた。リンゴ‘ふじ’の5つの樹形に関するCACOASの性能試験を行った。また、2つの樹形における骨格枝の配置あるいは剪定条件を変えたCACOASの性能試験を行った。その結果、プログラムは予期した通り稼動し、多くの樹冠情報、剪定情報および樹形・樹冠形の画像を出力した。また、5つの樹形あるいは2つの樹形における骨格枝の配置と剪定条件の影響にはそれぞれ

れの特徴および光環境の違いが確認できた。プログラムはvisual系BASICで作成され、総行約4600行であった。CACOASによる1樹形20年間の推定所要時間は、通常のパソコンでわずかに約45分であった。

### 引用文献

- Fisher, J. B. and Honda, H. (1979) Branch geometry and effective leaf area : A study of survey of real trees. *Amer. J. Bot.* 66 (6) : 645-655.
- 原田良平 (1978) 図解落葉果樹の整枝剪定. 誠文堂新光社. 東京.
- 林 拙郎・高橋洋子 (1999) 樹形のモデル化について—スギ・ヒノキ・サクラ類の場合—. 三重大学生物資源学部演習林報告. 23号 : 15-31.
- 本田久夫 (1979) 樹木の形を解析する. 自然. 11月号 : 68-76.
- 宮本敏雄・松田信行 (1964) 基礎数学ハンドブック. 森北出版. 東京.
- 菊地卓郎 (1987) 図解・樹形とせん定シリーズ. せん定を科学する. 農山漁村文化協会. 東京.
- Mize, J. H. and Cox, J. G (1969) シミュレーションの基礎 (小笠原 暁監訳). 培風館. 東京.
- 農林水産省 (1993) 農林水産省果樹試験場編集. 平成6年度果樹課題別研究会資料 (寒冷地果樹) リンゴの早期結実促進技術の確立.
- Prusinkiewicz, P. (1998) Modeling of spatial structure and development of plants : a review. *Sci. Hortic.* 74 : 113-149.
- 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 (2) : 89-116.
- 山本隆儀・畠 良七 (1991) 果樹の樹形・葉群構造の季節的变化推定システム. 山形大学紀要 (農学) 11 (2) : 343-373.
- 山本隆儀・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・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 (4) : 869-901.
- 山本 強 (1983) THE 3 DIMENSIONAL COMPUTER GRAPHICS. CQ出版社. 東京.