

果樹の樹形構築解析システム(CACOAS)を活用した 減農薬樹冠の評価法とこれを用いた セイヨウナシ減農薬樹冠の解析

山本隆儀¹⁾・須藤佐蔵²⁾*

¹⁾山形大学農学部生物生産学科農業生産学講座・²⁾山形県農業生産技術試験場
(平成19年9月20日受理)

Methods to Evaluate Advantageous Fruit Tree Crowns for Reducing Pesticide Use by Combining with the Canopy Constructing and Analyzing System of Fruit Trees(CACOAS)and its Applied Analyses to Pear Trees

Takanori YAMAMOTO¹⁾ and Sazou SUDOH²⁾

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

²⁾Department of Agro-Production Science, Yamagata Prefecture, Sagae, 991-0043, Japan

(Received September 20, 2007)

Summary

For the purpose of development of possible fruit tree crowns for reducing pesticide use, a facility of computing a value of tree crown surface area/tree crown volume(S-V ratio)was added to the previous system(Canopy Constructing and Analyzing System of fruit tree, CACOAS) In addition, another simulation model for distribution of pesticide deposits within a tree crown was constructed by using nonrandom leaf densities from CACOAS. The two simulations were carried out over 20 years for 154 pear tree forms, which were constructed by combining several arrangements of skeleton branches with five tree form groups under constraint condition of identical yearly orchard LAI by CACOAS. The S-V ratios resulted in the following relations; slender central leader>trellis training>Y shape>open center≒modified central leader. In a spray system using a nozzle, slim tree crowns as slender central leader or trellis training seemed to be advantageous to reduce pesticide use. As results from the pesticide deposit simulation, the drift proportions were very high and over about 60%, even if they were estimated at lowest. In order to correct the excessive deposit, the simulation results were standardized using a practical deposit level. As the result, large differences appeared in the mean values for 20 years of yearly spray volume per 10 a of land area within the 154 tree forms, and the minimum value was about 40% of the maximum. There was a positive correlation between mean spray volumes for 20 years after the standardization and each of tree height, volume under tree crown and leaf density. Conversely, there was a negative correlation between mean spray volumes and each of East-West tree width, inside void space, canopy volume, tree crown volume and land area occupied by tree crown. There was a positive correlation between mean deposits for 20 years before the standardization and each of outside void space, canopy volume, tree crown volume and land area occupied by tree crown. A negative correlation was found between the mean deposit and space volume under tree crown or leaf density, and not found against tree height.

Key Words : nonrandom distribution of leaf densities, pear, reducing pesticide use, simulation system by a computer, tree form

キーワード：葉密度の非ランダム分布，セイヨウナシ，減農薬，コンピュータによるシミュレーション，樹形

*現在，山形県村山総合支庁産業経済部農業技術普及課に勤務

緒 言

環境保全, 食品安全性確保などの社会的要請に応え, 低投入(省エネ・省資材)型果樹農業を実現するため, 現行の農薬散布量の5割減を目指す減農薬果樹栽培が強く求められている。このためのプロジェクトとして, 作物保護技術面(農薬の種類や防除システムなどの改良)および農業機械技術面(新タイプの散布機械の開発や現行機械による散布技術の改良)の研究が国の内外で開始されている。また, これらと協調した果樹栽培体系の見直しとして, 既存樹形の改変が試みられている。ただし, 既存樹形の改変のような応急的対策では果実生産性の低下や中途改変によるリバウンドが心配される。長期的観点からすれば, 植え付け当初からの骨格枝配置そのものを工夫した減農薬樹形(樹冠形)の開発が望まれる。とはいえ, 樹形開発試験には広大な面積, 長期間および管理・調査のための膨大な労力や経費を要するため, 減農薬樹形の開発はほとんど着手されていない。近年, 筆者らは「果樹の樹形構築解析システム(CACOAS)」(山本ら, 2004)とCACOAS用パラメータ(山本ら, 2007)を発表したが, その際多くの方々からCACOASを減農薬樹形の開発に役立てられないかとのご指摘を賜った。しかし, 現行CACOASには減農薬樹形を評価, 解析する機能を備えていない。本研究はこのための機能強化をはかりながら, 減農薬樹形の探索と開発を効率的に行なうとしたものである。

果樹園用スピードスプレー方式(以下, SS方式)の基礎的研究は外国でなされ, 我が国果樹園におけるSS方式防除に役立っている。ターゲットを定めて散布する定置配管あるいは移動式動力噴霧機からホースとノズルを用いて行う散布方式(以下, ノズル方式)と異なり, ターゲットを定めないSS方式については, 環境汚染や他作物への悪影響を防止する観点から, 最近, 漂流(drift)量の減少と効果的散布方法に焦点を絞った研究が展開されている。これらを大別すると, A)ノズル形態, 散布角度, ポンプ吐出量, 送風量, 車両進行速度などのSS諸元の改良(Svenssonら, 2003; Tsayら, 2004), B)樹列方向(進行方向), 風向, 風速, 空気中湿度, 栽植距離, 樹冠要因などの諸条件による影響の解析(Crossら, 2001; Farooq・Salyani, 2004; Stoverら, 2003), C)流体力学を用いた薬滴ジェット流や気流の樹冠内運動モデルによるシミュレーション研究(Deleleら, 2005

; Farooq・Salyani, 2004)がある。ただし, これらの研究からは減農薬にとって有効な方策ははまだ見出されていない。上記B)の中の樹冠要因による影響の解析研究では, 樹高, 樹冠直径, 樹齡, 樹列方向などの簡単なパラメータが用いられたが(Crossら, 2001), 葉量の非ランダム分布は全く考慮されていなかった。果樹樹冠内における葉量(および葉の生体情報)の空間分布の自由度は極めて大きい(Yamamotoら, 2005; 山本・岩波, 2005; Yamamoto・Miyamoto, 2004; 山本・奥山, 2004)。したがって, 減農薬樹形(樹冠形)の探索と開発にとって, 葉量の非ランダム分布を用いることが極めて重要であると考えられる。その際注意すべきことは, 果実生産性を維持しうる葉量を確保したうえで葉量の非ランダム分布を用いて解析することである。葉量の減少が減農薬をもたらすことは自明であるが, これは無意味に等しい。

本研究では, 最初に, 減農薬樹形にとって欠かせない樹冠内への薬滴浸入の容易さの指標として, 葉層表面積/葉層体積の値(以下, S-V比)を考案した。CACOASにおける樹冠情報解析ステップにS-V比の計算機能を追加し, セイヨウナシ‘ラフランス’の多様かつ多数の樹冠形を対象にシミュレーションを行い, その出力結果による薬滴浸入の容易な樹冠形を探索した。ただし, S-V比の高低は薬滴浸入の容易さを示すだけで, 薬滴の付着量(deposit)や農薬散布量に関する情報を提供しない。そこで, 次に, 薬滴付着量や10a当り農薬使用量を評価するための研究を行った。このための常法とも言うべき薬滴付着紙試験法や感湿紙試験法(農業機械学会, 1977)を用いるとき, 試験樹の準備などの問題のほか, 葉量が非ランダム分布する果樹樹冠の微妙な違いを捉えるためには極めて多数の試験紙を設置せねばならないという困難がある。同方法における試験紙設置可能数は1樹当たりせいぜい数十ヶ所であり, 通常, 27ヶ所以下である(農業機械学会, 1977)。一方, CACOASは数千ヶ所におよぶ樹冠各部位の葉密度データを出力する。これを活用すれば葉量の非ランダム分布を良く反映した薬滴付着量分布の解析が可能であろう。そこで, 本研究ではこのためのシミュレーションモデルを作成し, S-V比のときと同じ樹形(樹冠形)を対象に, シミュレーションを実施し, 薬滴の付着量や散布量を評価したものである。ただし, この場合は関連する変数やパラメータを定量的に扱うことができるSS方式に限定した。

材料および方法

1. S-V 比のシミュレーション

1) S-V 比の意義および CACOAS に結合した S-V 比計算アルゴリズム

いずれの散布方式でも、薬滴が樹冠内部まで附着し、かつ、過剰附着や樹冠外漂流を減らすことが重要である。樹冠内部まで薬滴が浸入するためには、樹冠外部と通じた空隙部分が多いほど、および、葉層体積に比べてその表面積が大きいほど有利である。葉層を個々の葉の集まりとしてとらえた場合、空隙、葉層体積、葉層表面積などを定量化することは極めて難しい。葉層を葉を含む立方体（以下、ブロック）の塊（葉層ブロック塊）として扱えば上記の定量化が容易である。そこで、樹冠を

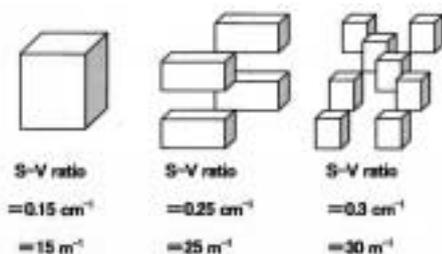


Fig. 1. Examples in S-V ratio of solids, which is aggregate of 8 blocks(cubes). Each block has edge of 20 cm length.

葉層ブロック塊の集合体としてとらえた。樹冠を大きくし、内部をまばらにすれば、樹冠の内外を連絡する空隙(gap)が多くなり薬滴が浸入しやすい。しかし、果実生産性の維持や栽培管理上の都合によって樹冠体積を大きくできない。樹冠体積一定としたときの空隙の多少を比較するには、樹冠表面積/樹冠体積(S-V比)を用いることが有効であり(第1図)、樹冠全体としてのS-V比が高いほど、樹冠内部に侵入する薬滴量も増大すると見なされる。散布作業の多くが園道から樹冠に向けて行われるので、園道方向に平行なブロック表面は薬滴流の進行方向に直面するのに対し、これ以外のブロック表面を通じた薬滴侵入は乱流に依存しやすい。したがって、薬滴流方向に垂直なブロック表面に限定した表面積/葉層体積(以下、垂直S-V比)についても計算した。

CACOASは樹冠全体をパソコン内で自由に設定できる3次元グリッド(以下、仮想グリッド)で仕切るとき、葉を含む内部立方体ブロックの積み木構造を作り出し、ブロックごとの葉面積密度データを出力する(第2図)。ブロックの積み木構造を用いたS-V比の計算は容易であるから、CACOASにこのための計算機能を追加した。すなわち、葉を含むブロックがその6面のいずれかで他の葉を含むブロックと隣接するとき連続した葉層ブロック塊の一部と見なし、1樹当たりのS-V比を最終的に計算するためのサブルーチンプログラムを現行のCACOASの樹冠解析ステップに追加した。現行の

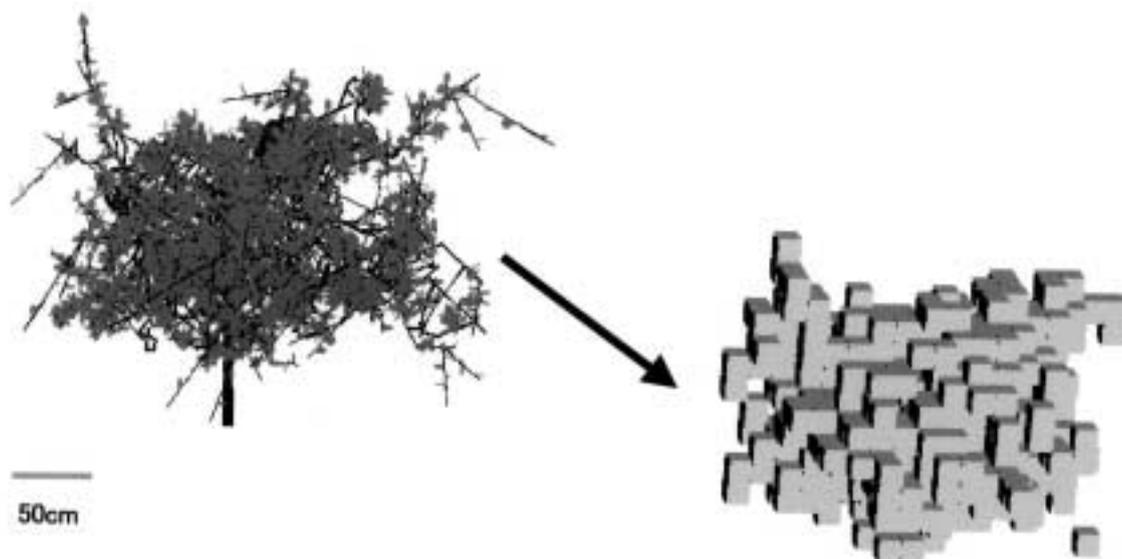


Fig. 2. Examples of graphic output from CACOAS, a tree crown(left)and its block structure(right)

CACOAS は、たとえば、 $21 \times 21 \times 21$ 個 (21^3 個) のブロックについて葉面積密度の配列変数を毎年出力する。配列変数を用いて葉を含むブロックの体積を合計し、葉層体積とした。グリッドの南北ブロック列、天地ブロック段および東西ブロック列の各ループからなる多重ループのもとで、以下の計算処理を行った。最初にブロックが葉を含むかどうか論理判断し、葉を含むブロックのそれぞれについて、上下左右前後6方向のうちの一方向に隣接するブロックについて葉を含むかどうかを論理判断した。葉を含むならばこのブロックを当該の葉層ブロック塊に含め、このときの隣接面の面積を表面積に加えなかった。葉を含まないならばこのときの隣接面の面積を表面積に加えた。また、当初のブロックがグリッドの境界に接するときは接した部分の面積を表面積に加えた。この計算処理を残りの5つの隣接方向についても繰り返した。上記計算処理を多重ループのもとで全ブロックについて繰り返した。最終的に合計された表面積を葉層体積で割り、S-V比とした。上記のS-V比計算処理と並行しながら、別の表面積記憶場所に東西方向に限定した表

面積を合計し、最終的に葉層体積で割ることで垂直S-V比とした。

2) CACOAS を用いた高 S-V 比樹形(樹冠形)探索のためのシミュレーション実験

上記の機能を追加した CACOAS を用いて、セイヨウナシ ‘ラ フランス’ を対象に、樹形群の種類(5つの樹形群)、栽植距離(南北樹幅制限長×東西樹幅制限長)および骨格枝配置(主枝の数、方角、長さ分布および位相角度、および、垂主枝の数と位相角度)のそれぞれの選択枝を組み合わせ(第1表)、その結果生じる合計154個の樹形(第2表)を対象に、それぞれ、20年間の樹形構築解析のシミュレーションを実施した。ただし、南北樹幅制限長と東西樹幅制限長からなる土地面積(以下、割当て土地面積)当たり LAI の年次別目標値、樹高制限値(全て 3.5 m)、垂主枝の長さ分布、剪定の規則、摘果割合(4果そうに1果)などは154樹形を通じて共通(1種)とした。このほか、CACOAS 専用パラメータである枝の発生・姿勢推定パラメータには既報(山本ら, 2007)における ‘ラ フランス’ 用パラメータを用

Table 1. The combinations of the alternatives in CACOAS, in which South-North limited width (SNLW), East-West limited width(EWLW) number of primary scaffold branches(NPSB) direction angle of first primary scaffold branch(DAFPSB) phase angle of primary scaffold branch(PAPSB) distribution of primary scaffold branch length(DPSBL) number of secondary scaffold branches(NSSB) phase angle of secondary scaffold branch(PASSB) and rotation angle of first secondary scaffold branch from earth axis(RAFSSB) were contained. Other alternatives in CACOAS, such as limited tree height(3.5 m) yearly desired LAI for limited area, distribution of secondary scaffold branches(bottom longer) fruit thinning(a fruit per four clusters) and pruning rules by CACOAS, were common. Here, the limited area is a product of SNLW and EWLW. Number of total tree forms in OC, MCL, YS, SCL and TT was 36, 36, 18, 48 and 16, respectively.

Alternatives	SNLW×EWLW	NPSB	DAFPSB	PAPSB
Groups	Units		Eight directions	degree
Open center (OC)	4×4, 3×5.33, 5.33×3	3	S, SE, E	120
Modified central leader (MCL)	4×4, 3×5.33, 5.33×3	5	S, SE, E	144
Y shape (YS)	4×4, 3×5.33, 5.33×3	2	S, SE, E	180
Slender central leader (SCL)	3×3, 2.25×4	7, 13	S, SE, E	144
Trellis training (TT)	2×4, 2.83×2.83	5, 7	S	180
Alternatives	DPSBL	NSSB	PASSB	RAFSSB
Groups	Units	by CACOAS	degree	degree
Open center (OC)	equal length, bottom longer	5	180, 144	90
Modified central leader (MCL)	equal length, bottom longer	3	180, 144	90
Y shape (YS)	equal length	5	180, 144	90
Slender central leader (SCL)	equal length, bottom longer	2, 1	180, 144	90
Trellis training (TT)	equal length, bottom longer	3, 2	180, 144	180

いた。

2. 葉滴付着量分布のシミュレーションモデル作成のための仮定条件およびシミュレーションの原理

CACOAS からの葉面積密度分布データを用いれば、葉量の非ランダム分布を反映する葉滴付着量分布シミュレーションモデルの作成が可能であると考え、以下のモデル作成作業に取り組んだ。なお、本シミュレーションの対象は1. に記した S-V 比の場合と全く同じ154樹形とした。また、樹列は南北列とし、SSが樹列に挟まれた園道を南北方向に走行し、樹列を変えてUターンを繰り返すものとした。このときSSは両側散布タイプとした。

1) 樹割り当て面積率, 散布対象空間(散布幅と散布域)および慣行散布量

減農薬効果を明らかにする目的で、様々な樹形(樹冠形)における 10a 当りの散布量を比較する場合、このための前提として、園地の樹割り当て面積率を可能な限り均等にしておく必要がある。並木植え南北列のときには、東西樹幅制限長の違いを園道幅で調整することで、これが可能である。本研究対象樹形における東西樹幅制限長の範囲が5種類(5.33 m, 4 m, 3 m, 2.83 m および 2 m)であったので(第1表), これら全てが等しい樹割り当て面積率を有し、かつ、園道内に1台のSSが走行できる幅を確保するためには、園地の樹割り当て面積率を66.7% (3分の2) にすれば良い。すなわち、樹割り当て面積率 = 東西樹幅制限長 / (園道幅 + 東西樹幅制限長) = 0.667 の計算式を用いれば、東西樹幅制限長が 5.33 m, 4 m, 3 m, 2.83 m および 2 m のときは、園道幅は、それぞれ、2.66 m, 2 m, 1.5 m, 1.41 m および 1 m になる。SSの噴霧部半径を 0.5 m とすれば、東西樹幅制限長が 2 m のときは噴霧部が東西樹幅制限領域の境界に接する状態になり、散布がかろうじて可能である(第3図上)。

実際の東西樹幅は東西樹幅制限値より小さくなることが多いが、両側散布方式のため片側にSSを近づけて散布することはできない。実際の南北樹幅の多くは南北樹幅制限長より小さいので、樹冠が欠けた部分の散布を休止できるものとした。また、実際の樹高が樹高制限長より低くなる場合は、SS運転操作により散布高を調整できるものとした。加えて、樹冠底部以下の領域を散布対象から除外できるものとした。上記の取り扱いと3種

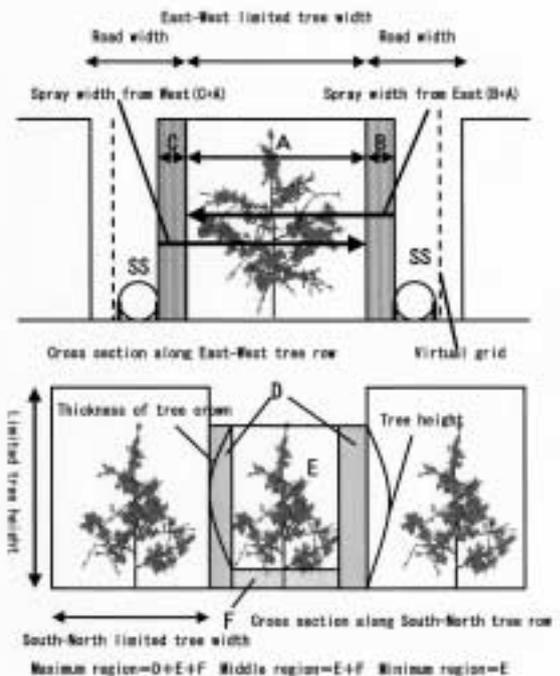


Fig. 3. Schemas of spray width(upper) and three spray-regions along South-North tree row (lower)

類の散布域の関係を第3図下に示した。CACOASにおける葉量3次元分布データは南北樹幅制限長、東西樹幅制限長、樹高制限長のうち最大の長さを1辺とする立方体グリッド(仮想グリッド)の中で扱う。この立方体という形状はCACOASにおける葉量3次元分布データを果樹園光環境解析システム(OLEAS, 山本, 1999)に渡す都合から立方体になっているだけで、この立方体グリッド全体に農薬を散布することではない。1樹当り散布対象空間は、南北樹幅、樹高あるいは樹冠の厚さ、および散布幅からなる直方体である。このうち、散布幅は東西樹幅制限長と園道幅により決まり固定されるが(第3図上)、残りの3者は樹齢によって年変化し、直方体の形状もこれらの組み合わせにより年ごと決定される(第3図下)。

様々な樹形(樹冠形)の農薬付着量分布を算出し、最終的に10a当り散布量を比較するためには、全樹形とも、園地の樹割り当て土地面積率が等しく、かつ、各年次における割り当て土地面積当り葉面積指数(LAI)が均等になるように設計されたうえで、適正な葉滴付着量を実現しうるための散布量を設定すること必要である。

従来、果樹園 10a 当たりの散布量は樹冠内部までの薬滴付着を可能にする最小散布量として経験的に定められている。しかし、農薬袋などに記載された慣行散布量(単位は 10a 当り L)は農薬調合上の概数であって、たとえば、リンゴなどの立木仕立てでは、10a 当り 200~700 L のように極めて曖昧な表示を見かける。言うまでも無く、樹齢や樹高などにより 10a 当り葉量には大きな違いがあることを反映した数値であろうが、その正確な根拠については不明である。そこで、筆者らは上記の 10a 当り 200~700 L が、並木植えを対象に樹列内には隙間が無く、樹列間に特別な園道を設けない場合で、樹高が 2~7 m に対応した数値であると想像し、さらに本シミュレーションにおける樹高制限が 3.5 m であったことから、この場合の 10a 当り設定散布量を 350 L とした。10a 当り設定散布量は後述のノズル噴霧量を計算するのに不可欠な入力パラメータである。ところで、10a 当り設定散布量は実際に散布される量(10a 当り散布量)ではない。結果および考察で詳しく論じるように、10a 当り散布量は樹冠形の年次変動と結びついた S S 運転方法や散布方法および栽植様式に関連した散布幅などによって大きく変わるからである。

2) ノズル噴霧量および農薬付着量

一般に、ノズル噴霧量は 1 式を用いて計算される(農業機械学会, 1977)。

$$q = 60/1000 \times V \times L \times G \times s \quad (1)$$

ここで、 q はノズル噴霧量 (L/min), V は S S の走行速度 (m/s), L は散布幅 (m), s は係数(両側散布では 1, 片側散布では 0.5) および G は 10a 当り設定散布量 (L) である。散布幅は S S 噴霧部から薬滴の到達限界点までの距離を意味し、第 3 図上に示すように園道の中心から S S 噴霧部半径 (0.5 m) を差し引いた距離に東西樹幅制限長を加えたものとして、(東西樹幅制限長 + 園道幅/2 - 0.5 m) の式により計算した。 V には文献から読み取れるものとして 5.8 km/h (=1.6 m/s) を採用した (Cross ら, 2001)。また、樹列をまたいで樹列端を U ターンする方式で同一樹列を重複散布するので係数 s には 1 (両側散布の場合) を用いた。

両側噴射方式の S S が 1 往復するとき、噴射される薬滴が上記の散布対象空間である直方体の園道側に面する 2 つの側壁全体を均等に横切るものと見なす。このとき、側壁 1 ブロックの正方形当り散布量を Q とし、内部の任意ブロックに捕捉される薬滴量(以下、ブロック捕

捉量)を Q' とする。また、 Q'/Q の値をブロック捕捉率とよぶ。薬滴付着量は上記のブロック捕捉量 (Q') とブロック内に存在する葉面積 (S) を用いて 2 式で計算する(単位は gcm^{-2})。

$$\text{薬滴付着量} = Q'/S = \text{ブロック捕捉率} \times Q/S \quad (2)$$

Q は以下に示すように、いろいろな条件により決まる変数である。画一的な樹高制限がなされ、S S の走行速度が一定であっても、東西樹幅制限長が異なれば散布幅も変化するので、1 式よりノズル噴霧量は異なる。1 式で計算されるノズル噴霧量が異なれば Q も異なる。一方、ブロック分割数は等しくても(本研究では 21 に固定)、グリッドの 1 辺の大きさが異なれば側壁 1 ブロックの正方形面積が異なり、結局 Q も異なる。

ノズル噴霧量などから、 Q を導くには、S S が 1 ブロック分移動に要する時間における S S から噴霧される薬滴量を計算し、これを制限樹高に相当するブロック数 (BN) で割ればよい。重さの単位には g, 長さの単位に cm, 時間の単位に s を用いる場合、 $Q(g)$ は 3 式で計算される。

$$Q = \text{ノズル噴霧量 (L/min)} \times 1000/60 \times$$

$$\text{ブロック 1 辺長 (cm)} / 160 (\text{cm/s}) / \text{BN} \quad (3)$$

3 式中の [ブロック 1 辺長 (cm) / 160 (cm/s)] の部分は S S がブロック 1 辺の長さを走行するのに要する時間 (s), [1000/60] の部分は L/min から g/s への単位の変更, および, [1/BN] の部分は縦に重なるブロック数で割ることを意味する。

3) モデルの仮定条件と薬滴付着量シミュレーションの原理

散布幅が決まると 1 式よりノズル噴霧量 q が確定するが、散布幅にも明確な定義が必要である。樹列に沿った往復散布の場合 S S からの最大到達距離を散布幅とする。このとき、対象樹を超えて隣の園道内に薬滴が漂流しないことを条件とする(第 3 図上)。この条件は減農薬の観点から与えたものであり、実際の散布では必ずしも守られていない。

S S からの薬滴粒子の運動は S S の噴霧部を構成する多数のノズルの傾き、薬滴粒子の運動エネルギー、空気摩擦抵抗、重力、浮力などによって影響され、噴射直後においては放物線状の軌跡を描き、終着点付近においては乱流状に落下するものと考えられる(第 4 図)。正方形の口から噴出されるジェット流の横方向広がり割合は移動距離 1 m 当り 0.1 m といわれ (Farooq・Salyani,

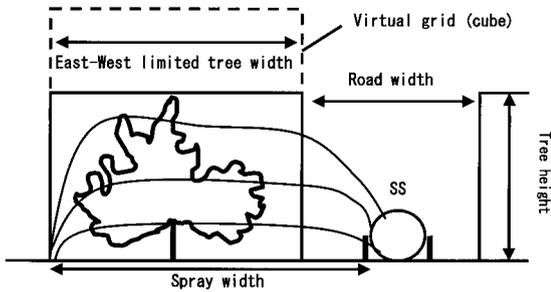


Fig. 4. A schema of droplet flow.

2004), これは片側角度で示すと約3度の傾きになる。また, 上下方向の広がり は上記横方向の広がり相当分に加え, 重力や浮力の作用が加わる。よって, ジェット流は全体的には矩形が扇形状に広がるものと考えられてい

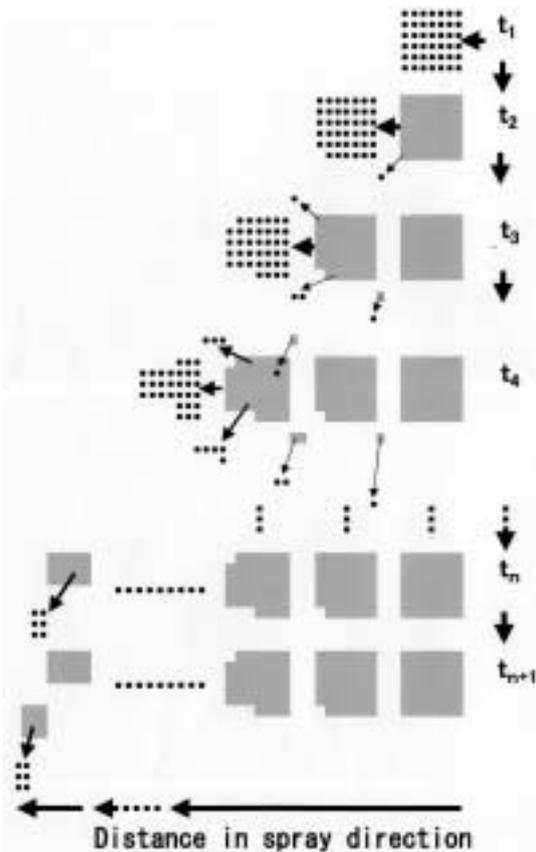


Fig. 5. A schematic description of pesticide-particles action in a narrow space. Round spots show pesticide-particles, and half-tone dot-meshing parts show their transition from the start to each time(t^*)

る (Farooq・Salyani, 2004). 水平方向の運動エネルギーの大きい葉滴は, 噴射直後, 水平方向に運動するが, 粒子の大きいものは空気摩擦抵抗により水平方向の運動エネルギーを喪失し, 重力により落下したり, 浮力により上昇するが, 最終的にいずれも落下する。第5図に模式的に示すように 狭い空間では 水平方向運動エネルギーを喪失した粒子は斜めに落下もしくは浮上する。しかし, 本シミュレーションで扱う1辺が数十cmの立方体(ブロック)空間では, ブロックに進入する葉滴粒子は水平方向にそのまま直進する部分, 真下に直進する部分および真上に直進する部分に分かれると見なす(第6図)。この直進の仮定は, 曲線を用いた複雑な解析の回避とブロック単位の敏速な計算処理の両者を可能にするから, 立方体グリッドと葉滴流を交錯させる解析の簡略化に役立つ。

水平方向に移動する葉滴粒子量に占める鉛直方向に変化する葉滴粒子量の割合は噴霧部からの距離の関数として経験的に求める必要がある。このためのモデル実験の方法については後述する。また, 鉛直方向に移動する葉

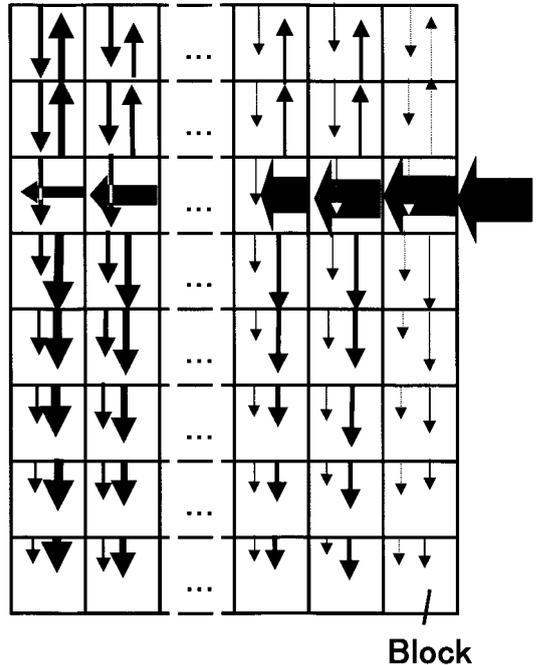


Fig. 6. A schematic description in blocks within a virtual grid of droplet flow when it was considered to be composed of horizontal movement and vertical movement.

滴粒子量のうち真上に移動する量の割合についても一つの仮定を設けた。すなわち、上記モデル実験を観察したところ、この割合は低く、鉛直方向に移動する葉滴粒子量の3分の1以下と見なされた。また、真上移動距離も僅かであったことから、ここでは最大2ブロック長とした。さらに、真上に移動し葉に捕捉されなかった葉滴粒子は間もなくまっすぐ落下するものと見なし(第6図)、このプロセスをモデルに組み込んだ。

ブロックに進入した葉滴粒子の一部はそのブロック内の葉群によって捕捉されるが、捕捉されない残りの葉滴粒子は直進するものと仮定した。直進の仮定により、葉群による葉滴粒子量の減衰は植物群落内直射光割合の減衰を参考にできる。植物群落内直射光割合の減衰の解析では、葉群の傾斜角度分布(たとえば、平均傾斜角度とその分散値を用いてベータ分布に近似したもの)から出発して、直射光入射角度(太陽光であれば太陽高度、 h_0)と水平面における直射光面積割合に関する減衰係数(K_D)の関係を使用する。この場合、群落外上部水平面における直射光面積(I_0)に対する累積葉面積指数(LAI)の葉層を通過した後の水平面上における直射光面積(I)の割合を $I/I_0 = \exp(-K_D \cdot LAI)$ の式で計算する(黒岩, 1990)。ただし、水平面上の割合のため、平行光線入射角度(h_0)が小さいときは K_D の値が非常に大きくなるのが特徴である。本研究では、任意の葉面積指数を有するブロックに入る葉滴粒子量に対するそのブロックを通過する葉滴粒子量の割合が必要であるが、植物群落内直射光の減衰計算のように水平面上の面積割合の減衰だけを計算するものではない。葉滴粒子が鉛直方向に移動するときには、ブロック底面(水平面)を通過する葉滴粒子量の割合を求めることになるので、直射光のときと同様に、真上からの葉滴流、すなわち、 $h_0=90$ 度のときの K_D 値が適する。しかし、葉滴粒子が水平方向に移動するときにはブロック側面(鉛直面)を通過する割合を求めることになるので、直射光の減衰計算とは性格が異なる。この場合、葉面が水平面となす角度としての葉の傾斜角度分布を用いる代わりに、葉面が鉛直面となす角度としての葉の「傾斜角度」分布に対する真横からの葉滴流、すなわち、 $h_0=90$ のときの K_D 値が必要になる。通常、 K_D 値の計算に先立ち、傾斜角度分布をベータ分布で近似してから、 K_D 値を数値積分する(Horia・Udagawa, 1971; 山本, 1999)。既に調査済みの葉の傾斜角度分布データ、すなわち、平均傾斜角度(α)とそ

の分散(δ^2)があれば、鉛直面となす角度としての葉の「傾斜角度」分布をわざわざ再調査しなくても良い。「傾斜角度」分布の平均傾斜角度は $90 - \alpha$ であり、その分散は変わらず δ^2 のままである。こうしたうえで、 $h_0=90$ に対する K_D を上記同様に数値計算した。なお、本シミュレーション中のパラメータ名として、水平方向の葉滴粒子量減衰係数には horizontal の意味で K_h 、鉛直方向のそれには vertical の意味で K_v の略号を用いた。

以下、葉滴流の一般的な減衰過程について記す。ここでは減衰係数を単に K で表現し、ブロック内の葉面積指数を LAI とする。ブロックに入る葉滴粒子量に対するブロックから出る葉滴粒子量の割合を減衰率とすれば、減衰率 $= \exp(-K \cdot LAI)$ の関係が成立するものと見なした。したがって、そのブロック内の葉群に捕捉される葉滴粒子量の割合は $1 - \exp(-K \cdot LAI)$ に等しい。

まず水平方向の葉滴粒子量の減衰過程を記す。水平方向に隣接する2つのブロックをブロック₁とブロック₂とし、また、それぞれの LAI を LAI₁ と LAI₂ とすれば、ブロック₁ に流入した葉滴粒子量に対する、ブロック₁ に捕捉される葉滴粒子量の割合およびブロック₁ からブロック₂ に移動する葉滴粒子量の割合は、それぞれ、 $1 - \exp(-K_h \cdot LAI_1)$ および $\exp(-K_h \cdot LAI_1)$ である。したがって、ブロック₁ に流入した葉滴粒子量に対する、ブロック₂ に捕捉される葉滴粒子量の割合およびブロック₂ から出る葉滴粒子量の割合は、それぞれ $\exp(-K_h \cdot LAI_1) \times (1 - \exp(-K_h \cdot LAI_2))$ および $\exp(-K_h \cdot LAI_1) \times \exp(-K_h \cdot LAI_2)$ である。

次に、鉛直方向の葉滴粒子運動が上記の水平運動に加わる場合を述べる。ここでは、あるブロックから水平方向に流出する葉滴粒子量(以下、 Q^*)のうち、隣のブロック(以下、ブロック₁)に85%が移動し、残り15%の3分の1(5%)がブロック₁の真上のブロックに、3分の2(10%)がブロック₁の真下のブロックに移動すると仮定する。以下、これらの割合は固定したままにする。 Q^* に対してブロック₁ に移動する葉滴粒子量の割合およびブロック₁ に捕捉される葉滴粒子量の割合は、それぞれ、0.85 および $0.85 \times (1 - \exp(-K_h \cdot LAI_1))$ である。 Q^* に対するブロック₁ の真上に移動する葉滴粒子量の割合および真下に移動する葉滴粒子量の割合は、それぞれ、0.05 および 0.10 である。また、 Q^* に対するブロック₁ から水平方向に流出する葉滴粒

子量の割合は $0.85 \times \exp(-Kh \cdot LAI_1)$ である。このうち、ブロック₂に85%、ブロック₂の真上のブロックに5%および真下のブロックに10%が移動することになるので、 Q^* に対するブロック₂、ブロック₂の真上ブロックおよび真下ブロックに移動する葉滴粒子量の割合は、それぞれ、 $0.85 \times 0.85 \times \exp(-Kh \cdot LAI_1)$ 、 $0.05 \times 0.85 \times \exp(-Kh \cdot LAI_1)$ および $0.10 \times 0.85 \times \exp(-Kh \cdot LAI_1)$ である。また、 Q^* に対するブロック₂に捕捉される葉滴粒子量の割合およびブロック₂から水平方向に流出する葉滴粒子量の割合は、それぞれ $0.85 \times 0.85 \times \exp(-Kh \cdot LAI_1) \times (1 - \exp(-Kh \cdot LAI_2))$ および $0.85 \times 0.85 \times \exp(-Kh \cdot LAI_1) \times \exp(-Kh \cdot LAI_2)$ である。 Q^* に対するブロック₁の真上のブロックに捕捉される葉滴粒子量の割合は $0.05 \times (1 - \exp(-Kv \cdot LAI_u))$ であり、真上のブロックから、さらにその上に流出する葉滴粒子量の割合は $0.05 \times \exp(-Kv \cdot LAI_u)$ である。ここで LAI_u は真上のブロックの LAI である。また、 Q^* に対してブロック₁の真下のブロックに捕捉される葉滴粒子量の割合は $0.10 \times (1 - \exp(-Kv \cdot LAI_l))$ であり、真下のブロックから、さらに、その下に流出する葉滴粒子量の割合は $0.10 \times \exp(-Kv \cdot LAI_l)$ である。ここで LAI_l は真下のブロックの LAI である。さらにこれらよりも上方または下方のブロックに捕捉される葉滴粒子量の割合および流出する葉滴粒子量の割合についても同様な計算式を用いた。ただし、真上に移動した葉滴のうち、葉群に捕捉されなかった部分は間もなく重力に逆らえず元の道をたどり、ブロック₁を経由した後、その真下におけるブロックからの葉滴粒子運動に合流するので、これに対応した計算アルゴリズムを用いた。上記説明の中では、便宜的に、水平方向から鉛直方向に向きを変えて移動する葉滴粒子量の割合を0.15に固定したが、噴霧部からの水平距離によってこの割合が変化するものと考え、シミュレーション中では、上記の割合を変数として扱った。

葉滴運動の開始点をSS噴射部に設定したうえで、SSが樹列に沿って1樹列分噴射し終わるまで上記計算を続け、さらに、反対側園道から1樹列分噴射し終わるとき、各ブロックに捕捉される葉滴粒子量の合計値は2)に記したブロック捕捉量に等しい。

鉛直方向に上昇する葉滴粒子量の減衰計算については当該ブロックより2段上のブロックまで行った。次に向きを下向きに変更して垂直に落下する葉滴粒子量の減衰

計算を当該ブロックまで行い、さらに鉛直方向に落下し続ける葉滴粒子については当該ブロックにおける当初からの鉛直方向に落下する葉滴粒子に合流させて減衰計算を継続し、グリッド最下段に達する時点で打ち切った。このときの残存葉滴粒子量を樹冠外漂流量の記憶場所に加算した。また、散布量に対する樹冠外漂流量の割合も計算した。噴射方向へ1ブロックずつ移動するとき、途中に葉の存在しないブロックが存在しても、そのブロックにおける鉛直方向への移動の計算は欠かさず行った。なぜならば、その上下方向のブロックには葉が存在する可能性があったからである。

4) 入力するデータとパラメータ、派生パラメータ、出力項目およびプログラムの流れ

CACOASからの20年間の年次別葉数空間分布データ(21³個の立方体ブロックに含まれる葉数)を本シミュレーションに用いた。立方体ブロックの LAI は各ブロック内葉数に個葉面積を乗じ、ブロック1辺長の2乗値(正方形の面積)で割ることで求めた。

本シミュレーションには、開始時に入力するパラメータとして、ブロック1辺長、グリッド分割数(=21)、個葉面積、水平方向の葉滴粒子量減衰係数 Kh 、鉛直方向の葉滴粒子量減衰係数 Kv 、南北樹幅制限長、東西樹幅制限長、および樹高制限長がある。上記の多くはCACOASの出力値をそのまま用いた。ただし、 Kh と Kv については既報(山本ら、1990)の‘ラフランス’葉の傾斜角度分布(平均値と分散値)から、3)に記した方法により算出したが、本シミュレーションではこれらのうちから7月と8月の平均値を用いた。このほか、葉滴の飛散距離による鉛直方向に方向転換する葉滴粒子量割合を推定するための式パラメータを入力した。

上記データおよびパラメータを用いてプログラムが最初に自動検出あるいは自動計算する数値(派生パラメータ)として以下のものがあげられる。すでに記したように、散布対象空間の寸法は東西樹幅制限長、南北西樹幅制限長、樹形や樹齢と異なる実際の南北樹幅、および実際の樹高(あるいは樹冠厚さ)の組み合わせにより決まり(第3図)、通常その形状は長方体になる。これは立方体の仮想グリッドより小さい。そこで、プログラムは上記の組み合わせで決まる3種類の散布域(第3図)をあらかじめ準備するため、葉数3次元分布配列変数を精査することで仮想グリッドの中の葉が含まれるブロックを探し、3軸(x , y , z)上の解析範囲としての開

始X, 終了X, 開始Y, 終了Y, 開始Zおよび終了Zを自動検出した。ここで, X, YおよびZは3次元配列の添え字であった。樹高は毎年変動したので, 葉数3次元分布配列変数の添え字Zのもっとも小さい数値を開始Zとし, これに相当する高さをその年の樹高とした。また, 樹冠底部高も毎年変動するので, 同添え字Zのもっとも大きい数値を終了Zとし, これに相当する高さをその年の樹冠底部高とした。南北樹幅についても同様に年変動したので, 3次元分布配列変数の添え字Yの最も小さい数値(南端)と最も大きい数値(北端)を見出し, それぞれ, 葉滴流解析範囲における開始Yと終了Yとした。また, すでに記したように, 園地の樹割り当て面積率を等しくする目的で園道の幅を自動計算し, その結果, 散布幅が確定すると, 2)に記した方法に準じて, ノズル噴霧量が自動計算され, さらに, 側壁1ブロックの正方形当り散布量Qが自動計算された。

上記数値が全て準備され, シミュレーションの中枢部(葉滴粒子量の減衰および葉滴付着量の計算)に引き継がれるが, 中枢部の内容説明の前に出力項目について記しておく。毎年の各ブロックにおける平均付着量を基礎データとして保存するとともに, これらから葉滴付着量の各年の平均値, 最小値, 最大値, 標準偏差および変動係数, 付着むら判定のためのヒストグラム作成用データ, 1樹散布量, 樹冠外漂流量, 樹冠外漂流量割合(1樹散布量に対する樹冠外漂流量の割合), および, 園地10a当り散布量を出力した。1樹散布量は個々の樹形のブロック1辺長および樹齢ご異なる散布対象空間(直方体)断面の大きさ(第3図)の両者により決定される(4式)。

$$1 \text{ 樹散布量} = \text{散布対象空間(直方体)側壁のブロック数} \times \text{側壁ブロック当り散布量(往復分)} \quad (4)$$

この場合, SS運転操作により散布対象空間を調節できるとしたうえで, 4式の散布対象空間(直方体)断面の寸法として, 樹高, 樹冠底部, 南北樹幅の3者の実際値を取り入れたときの1樹散布量を1樹最小散布量と称し, 樹高と南北樹幅の2者の実際値を取り入れたときを1樹中間散布量と称し, 樹高のみの実際値を取り入れたときを1樹最大散布量と称し, それぞれ区別した(第3図下)。次に上記の1樹散布量を用いて10a当り散布量を5式を用いて計算した。

$$10 \text{ a 当り散布量} = 1 \text{ 樹散布量} \times \frac{10000000 \text{ cm}^2 / \text{南北樹幅制限長 cm}}{(\text{東西樹幅制限長 cm} + \text{園道幅 cm})} \quad (5)$$

5式の1樹散布量の値として1樹最小散布量, 1樹中間散布量および1樹最大散布量を用いたときの10a当り散布量を, それぞれ, 10a当り最小散布量, 10a当り中間散布量および10a当り最大散布量とした。樹冠外漂流量についても, 上記同様な散布対象空間の制限に基づき, それぞれ, 最小, 中間および最大の接頭語をつけた。1樹最小散布量のときの漂流量を算出し, これを最小樹冠外漂流量としたうえで, 1樹中間散布量と1樹最小散布量の差を最小樹冠外漂流量に加えたものを中間樹冠外漂流量とした。さらに, 1樹最大散布量と1樹最小散布量の差を最小樹冠外漂流量に加えたものを最大樹冠外漂流量とした。樹冠外漂流量割合は樹冠外漂流量を散布量で割ったものであったが, この場合にも, 上記同様な散布対象空間に基づき, それぞれ, 最低, 中間および最高の接頭語をつけた。

パラメータ入力後, プログラムは樹齢ループの中で, CACOASからの各年の葉数空間分布データを読み込み, 派生パラメータの計算を行い, さらに, SS往復ループの中で以下の計算処理を行った。すなわち, グリッドのブロックに関する南北列ループ, 天地段ループおよび東西列ループからなる多重ループのもとで, ブロック単位に水平方向流入, 水平方向流出, 鉛直方向(真上方向と真下方向)流出および鉛直方向(真下方向)流入のそれぞれの葉滴粒子量を計算しながら, 当該のブロック, これと水平隣の1ブロック, 上隣2段分のブロックおよび真下方向全ブロックの配列変数に葉滴捕捉量を加算した。また, 別の1個の記憶場所に樹冠外漂流量を加算した。上記計算処理を多重ループの中で全て終え, さらにSS往復ループを終了後, 各ブロックの葉滴捕捉量と葉面積から各ブロックの付着量を計算するとともに, 専用の出力ファイルに書き出し, 樹齢ループに戻った。計算所要時間は極めて短く, 通常, 1樹形20年間で1分未満であった。

3. パラメータ入手実験

経験的に入手せねばならないパラメータとして, 鉛直方向に方向転換する葉滴粒子量の割合がある。また, 本シミュレーション結果における葉滴付着量の過不足を検討するためのパラメータとして, 慣行栽培における葉滴

付着量がある。これらの入手実験方法を以下に記す。

1) 噴出口からの相対的距離を用いて鉛直方向に方向転換する薬滴粒子量の割合を推定するためのパラメータ入手実験

実験には、SS(散布粒子径 $60\sim 150\mu$)を用いて行うのが理想的であったが、実験規模が大きくなりすぎることに、および、自然下の風の影響を避けるために、室内におけるモデル実験を行った。市販の電動噴霧器(ナショナル, BH-589)、送風機(三菱, EKL-15H)および塩化ビニル樹脂製パイプ(直径18cm, 長さ50cm)からなる噴霧装置(第7図)を作製し、噴霧装置から等間隔に設置した集水容器(発砲スチロール製ボール)に溜まる水量の分布データおよび飛散水量の合計量から、薬滴移動距離と鉛直方向転換割合の関係を調査した。

2) 慣行栽培における薬滴付着程度の調査方法

山形大学農学部実験圃場果樹園およびやまがたフィールド科学センター果樹園のリンゴ樹を用いて、クレフ

ノンの混入した薬剤に限定して、散布前にほぼA4版の大きさの黒板(黒色塩化ビニルフィルム)を樹冠内部に多数吊るし、散布後回収し、クレフノン薬滴の付着面積率(%)を以下の方法で画像計算した。すなわち、黒板の上にスケール用円形マークを添付してから、イメージスキャナ(EPSON Scan)により200dpiで黒板画像(第8図A)を取り込み、画像解析処理ソフト(デジモ社, Image Hyper II)で、白黒輝度50で2値化し(第8図B)、反転後、黒板当り3ヶ所にROI(関心領域)を設定し、クレフノン薬滴の面積率(%)を画像計算し、平均した。なお、実験圃場果樹園では動力噴霧器を用いたノズル方式により散布し、やまがたフィールド科学センター果樹園ではSSにより散布したものであった。

室内で、上記よりやや大きめの黒板(第8図C)にガラス式スプレーでクレフノン水溶液(100倍)を種々の程度の分量で散布した。散布前後にガラス式スプレーの重量を測り、毎回、薬滴散布量を算出した。クレフノン

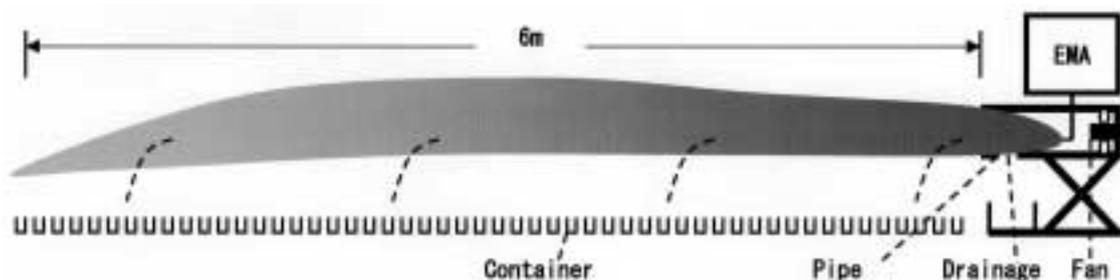


Fig. 7. The equipment of a model test for flight-distance of atomized water droplet using an electromotive atomizer(EMA)

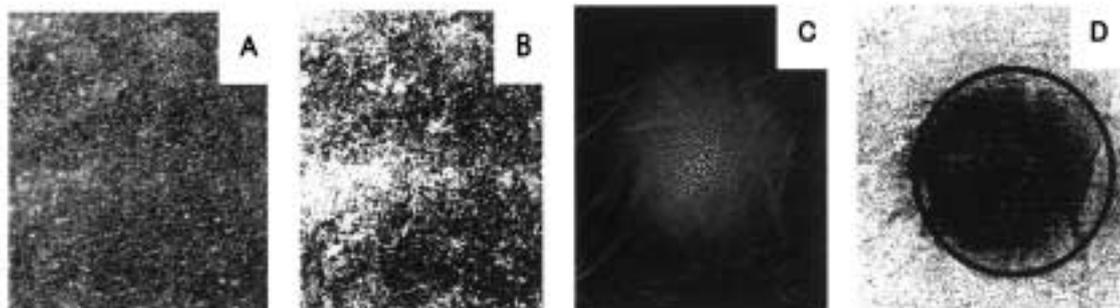


Fig. 8. Photographs of deposits on black plates(black sheets of polyvinyl chloride)and their image processing. A: A photograph, 1/4 of size of a black sheet(A4-edition) after a pesticide(Calcium carbonate, "CLEF-NON") spray. B: The binary image of A(the thresholds=50). C: A photograph of entire black sheet after the same pesticide spray in the calibration test. D: The reversal image of the binary image(the thresholds=50)of C. The circle indicates the border line to obtain its main sprayed area.

葉滴の付着面積率 (%) は果樹園散布のときと同じ要領で画像計算した。検定実験であったので、散布領域の面積も測定したが、その境界部がやや不鮮明になったので、主たる散布領域を目視により判断して画像上に輪郭線を描き (第 8 図 D), この散布領域の面積を別途画像計算した。次に、この領域面積と散布量を用いて葉滴付着量 (cm² 当りクレフノン液の重さ) を計算した。室内実験における葉滴付着量 (cm² 当りクレフノン液の重さ) と付着面積率 (%) の関係を調査し、両者の関係式を得た。この関係式と果樹園散布のときの付着面積率から慣行栽培における葉滴付着量を求めた。

結果および考察

1. S-V 比の比較結果

S-V 比は積み木構造ブロックの目の粗さ (1 辺の長さ) に反比例する性格を有するので、シミュレーションからの S-V 比出力値をそのまま用いて比較できない。そこで、1 辺 4 m の立方体グリッド (各辺 21 分割) を標準にして S-V 比を補正したもので比較した。

1) CACOAS からの各出力値, S-V 比および垂直 S-V 比の年次的推移例

20年間の CACOAS からの各出力値には LAI 年次別目

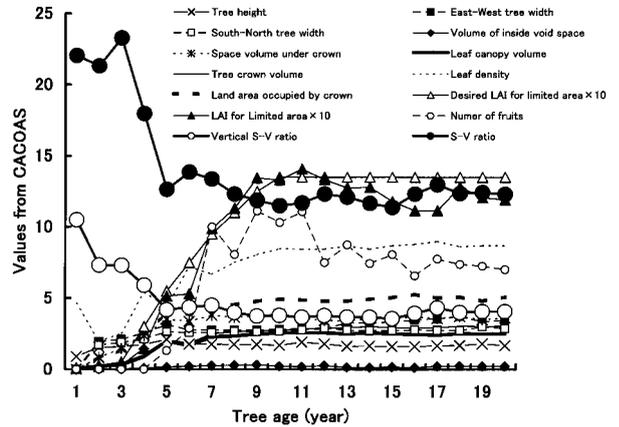


Fig. 9. An example of several outputs from CACOAS of a tree form (No. 101). The unit of vertical axis is m for length, m² for area and m³ for volume, m⁻² for number of fruits, and m⁻¹ for both density and S-V ratio, respectively.

標値およびその実現 LAI に対応した年次変動が見られた。たとえば、葉層体積や葉密度などの数値は増大し、S-V 比および垂直 S-V 比は低下した (第 9 図)。

2) S-V 比および垂直 S-V 比の 20 年間平均値の樹形群間比較および全樹比較

上記数値の主なものについて、20 年間平均値を樹形群

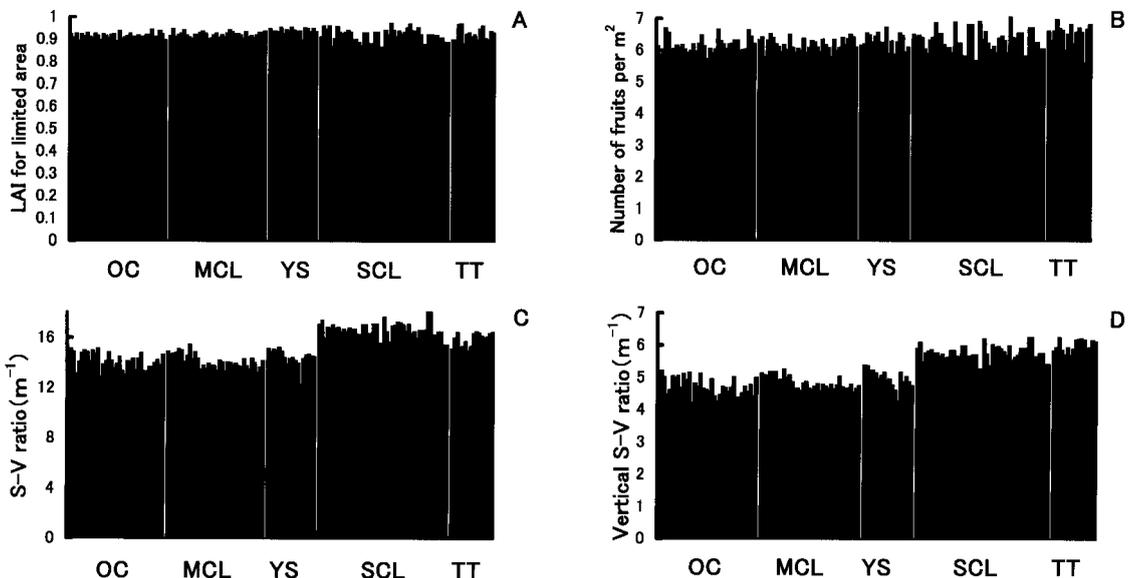


Fig. 10. The mean values for 20 years of yearly LAI for limited area (A), yearly number of fruits per m² (B), yearly S-V ratio (C) and yearly vertical S-V ratio (D). OC, MCL, YS, SCL and TT denotes open center, modified central leader, Y shape, slender central leader and trellis training, respectively.

Table 3. The group mean (Mean) and the group range (Max. and Min.) in each tree form group of mean values for 20 years of yearly LAI for limited area, yearly number of fruits per m^2 , yearly S-V ratio and yearly vertical S-V ratio. The abbreviation of tree form groups refer to Table 1.

		Tree form groups				
		OC	MCL	YS	SCL	TT
LAI for limited area	Mean	0.92	0.92	0.94	0.92	0.92
	Max.	0.94	0.95	0.95	0.97	0.97
	Min.	0.89	0.90	0.90	0.87	0.88
Number of fruits per m^2	Mean	6.2	6.2	6.3	6.3	6.5
	Max.	6.7	6.5	6.7	7.1	7.0
	Min.	5.7	5.8	5.9	5.7	5.6
S-V ratio	Mean	14.1	14.1	14.4	16.6	15.9
	Max.	15.1	15.4	15.2	18.1	16.5
	Min.	12.9	13.2	12.3	15.4	15.0
Vertical S-V ratio	Mean	4.7	4.8	5.0	5.8	6.0
	Max.	5.2	5.3	5.4	6.3	6.2
	Min.	4.2	4.5	4.3	5.3	5.7

間で比較したところ、面積当たり着果数および割り当て土地面積当り LAI はほぼ均等であったが(第10図AおよびB)、S-V 比および垂直 S-V 比には樹形群間で差

異が認められ、細形主幹形>トレリス誘引>Y字形>開心形≡変則主幹形の高低関係が現れた(第10図CおよびD、第3表)。

樹形群にとられずに、S-V 比および垂直 S-V 比の20年間平均値を大きい順に並べ(第11図CおよびD)、154樹形の最大値と最小値の間の差を最大値で割ったところ、それぞれ、32.1%および32.6%であった。S-V 比の20年間平均値の大きい順に面積当たり着果数および割り当て面積当り LAI をならべたところ(第11図AおよびB)、S-V 比の序列とは独立していた。また、上記4種の数値の年次変動を S-V 比の20年間平均値の大きい順に比較したところ(第12図)、割り当て土地面積当り LAI は樹齢8~10年までは急速に上昇し(第12図A)、面積当たり着果数も樹齢とともに急速に増大し、8~10年にピークに達し、その後飽和状態を経過しながら、漸減した(第12図B)。S-V 比および垂直 S-V 比は、それぞれの20年間平均値の大小関係をほぼ保ちながら、ともに5~6年まで急減したが、その後安定した(第12図CおよびD)。割り当て土地面積当り LAI は全体的に年次別目標 LAI に沿ったものになったが(第12図A)、目標値を少し上下した(第3図)。これは翌年の実現 LAI の調節手段として前年の冬季剪定量を加減するという CACOAS 独自の自動調節機構(山本ら、2004)の結果である。また、面積当たり着果数の年次変動は CACOAS

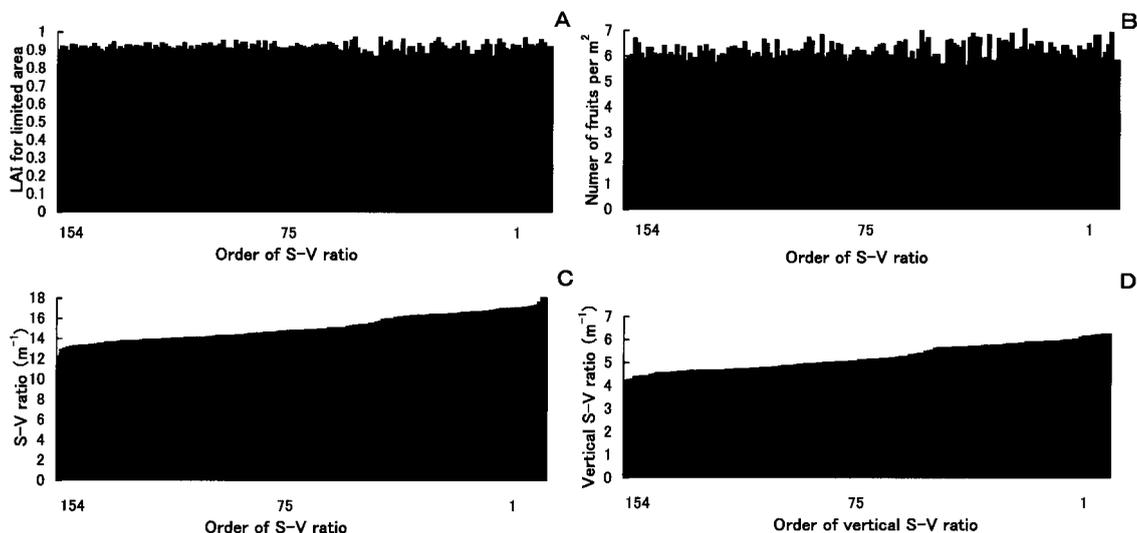


Fig. 11. The mean values for 20 years of yearly LAI for limited area (A), yearly number of fruits per m^2 (B) and yearly S-V ratio (C) and yearly vertical S-V ratio (D). In each "y" axis, tree forms were arranged in order of S-V ratio in A, B and C, and in order of vertical S-V ratio in D.

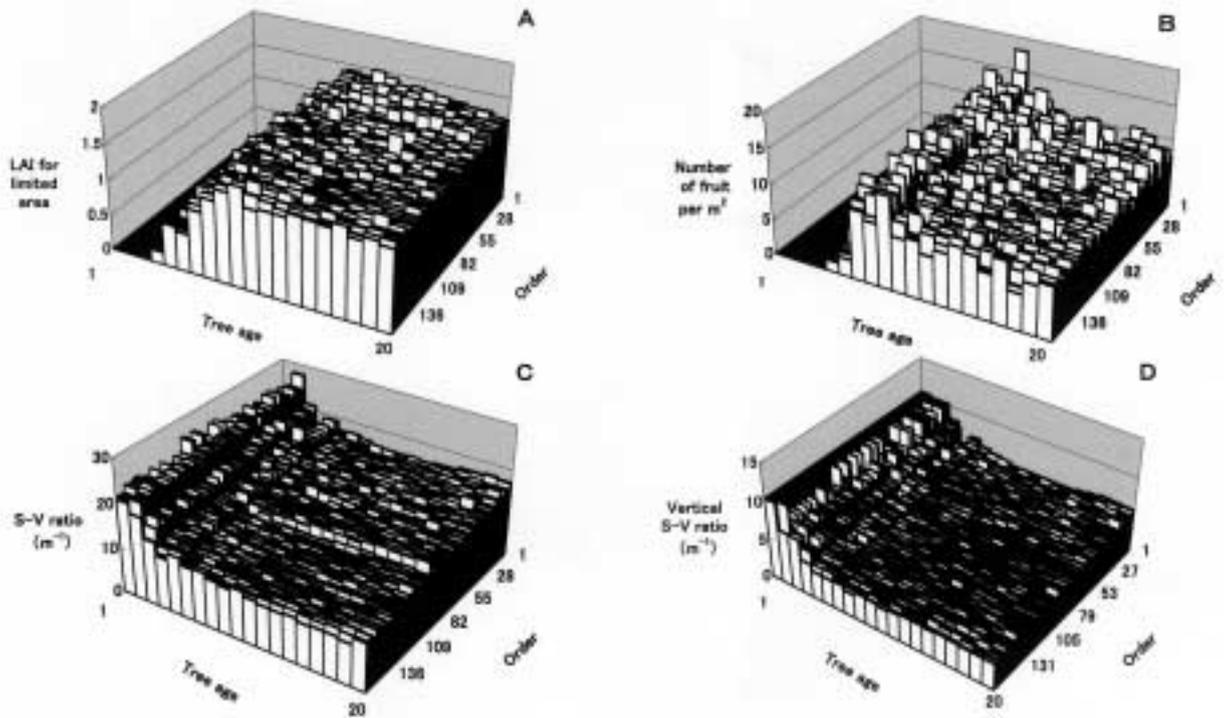


Fig. 12. The yearly values of LAI for limited area (A), number of fruits per m^2 (B), S-V ratio (C) and vertical S-V ratio (D) for 20 years. In each "y" axis (order), tree forms were arranged in order of S-V ratio in A, B and C, and in order of vertical S-V ratio in D.

内で独自に自動調節されたものではなく、画一的な摘果割合や葉果比、LAIの年次変動、残存した結果母枝量などを用いて総合的に算出されたもので、いわば、CACOASによる推定結果であった。

3) S-V比の20年間平均値とCACOASからの樹冠解析値(20年間平均値)との間の相関関係

樹形群にとらわれずにS-V比の20年間平均値とCACOASからの樹冠解析値(20年間平均値)の間の相関係数を算出したところ、両S-V比とも、樹高(≤3.5 m)、ブロック葉密度平均値および樹冠下空間体積に対して正、樹冠占有面積、葉層体積、南北樹幅、東西樹幅、樹冠体積、内部無効体積に対して負の、いずれも有意な相関関係が認められた(第4表)。これに対し、面積当たり着果数および割り当て土地面積当りLAIとの相関は低かった(第4表)。以上のことから、葉量を変えない条件下では、樹冠形がスリムな樹形が減農薬にとって有利であると考えられる(第13図)。第5表は両S-V比の大きさ順に並べた樹形番号を示したものである。

同一樹形群内においてもS-V比に相当の変動が見ら

Table 4. Correlations of coefficient between mean values for 20 years of yearly S-V ratios or yearly vertical S-V ratios and mean values of for 20 years of several yearly crown informations in the 154 tree forms constructed by CACOAS.

Crown informations	S-V ratio	Verical S-V ratio
Tree height	0.7300***z	0.7722***
East-West tree width	-0.6185***	-0.7591***
South-North tree width	-0.6400***	-0.6024***
Volume of inside void space	-0.4593***	-0.5473***
Space volume under crown	0.6442***	0.6087***
Leaf canopy volume	-0.8531***	-0.8669***
Tree crown volume	-0.8322***	-0.8515***
Leaf density	0.6509***	0.6397***
Land area occupied by crown	-0.7980***	-0.8600***
LAI for limited area	0.0748	0.0827
Number of fruits per m^2	0.2425*z	0.3097**z

z***, ** and * indicates significance at 0.1%, 1% and 5% level, respectively.

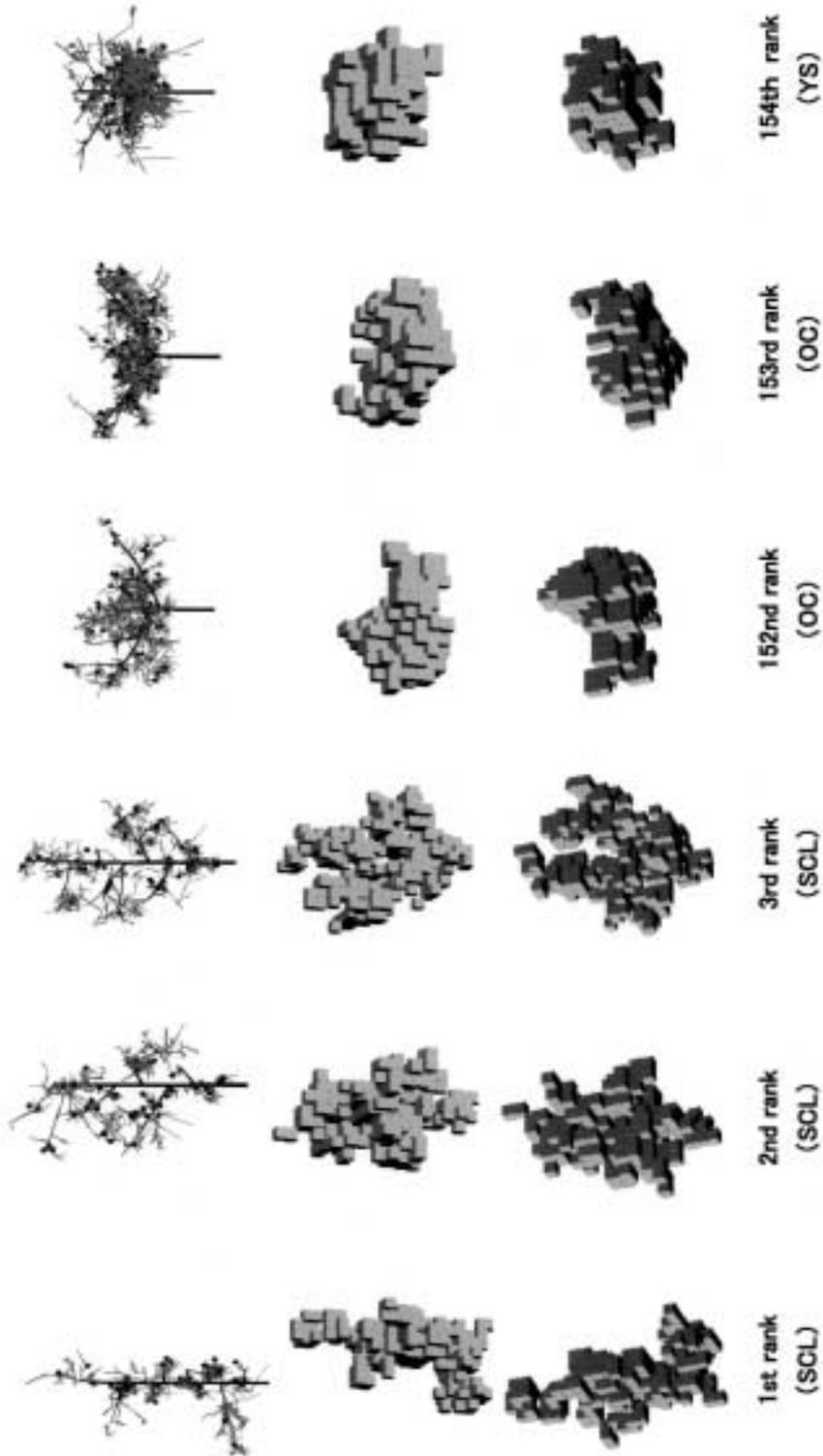


Fig. 13. Tree forms (upper) and block structures of leaf canopies (middle and lower) of the 1st, the 2nd, the 3rd, the 152nd, the 153rd and the 154th ranks in the values of S-V ratio within the 152 tree forms of 10 year-old. Abbreviations in the parentheses show tree form groups.

Table 5. The tree form number(Table 2)which was arranged in order of mean value for 20 years of yearly S-V ratio or yearly vertical S-V ratio in the 154 tree forms constructed by CACOAS.

Order	S-V ratio	Vertical S-V ratio									
1	441	441	40	420	426	79	103	116	118	221	132
2	442	442	41	509	410	80	302	110	119	124	230
3	425	503	42	435	505	81	116	211	120	233	124
4	402	511	43	415	421	82	204	202	121	224	101
5	430	425	44	443	422	83	128	307	122	312	115
6	431	510	45	444	437	84	106	203	123	133	125
7	421	512	46	416	507	85	203	108	124	226	127
8	422	509	47	512	433	86	111	229	125	216	214
9	434	515	48	514	415	87	202	106	126	119	218
10	401	516	49	513	419	88	316	316	127	308	232
11	417	402	50	502	420	89	136	103	128	114	225
12	418	428	51	437	409	90	315	128	129	135	109
13	432	431	52	403	416	91	208	136	130	225	235
14	406	417	53	506	443	92	317	210	131	217	213
15	429	418	54	427	444	93	516	107	132	214	231
16	428	430	55	423	436	94	318	306	133	218	117
17	404	502	56	424	412	95	120	310	134	230	227
18	408	429	57	447	411	96	307	120	135	227	118
19	405	514	58	448	435	97	310	309	136	228	219
20	412	506	59	209	403	98	212	208	137	131	312
21	407	438	60	505	447	99	309	207	138	235	105
22	410	439	61	508	448	100	232	111	139	132	215
23	413	440	62	504	301	101	125	317	140	118	222
24	414	513	63	305	302	102	127	217	141	215	119
25	439	431	64	102	427	103	314	212	142	231	126
26	440	401	65	301	423	104	229	315	143	213	133
27	438	508	66	112	424	105	210	216	144	126	234
28	433	406	67	501	209	106	220	114	145	219	131
29	510	504	68	205	304	107	134	221	146	129	104
30	436	413	69	303	303	108	311	223	147	130	123
31	426	414	70	206	102	109	236	226	148	121	121
32	445	501	71	107	204	110	117	233	149	222	135
33	446	405	72	507	205	111	123	311	150	234	129
34	409	432	73	110	206	112	115	228	151	104	130
35	411	408	74	304	314	113	101	134	152	122	313
36	503	407	75	306	308	114	109	318	153	113	122
37	511	445	76	201	112	115	223	236	154	313	113
38	515	446	77	108	305	116	207	224			
39	419	404	78	211	201	117	105	220			

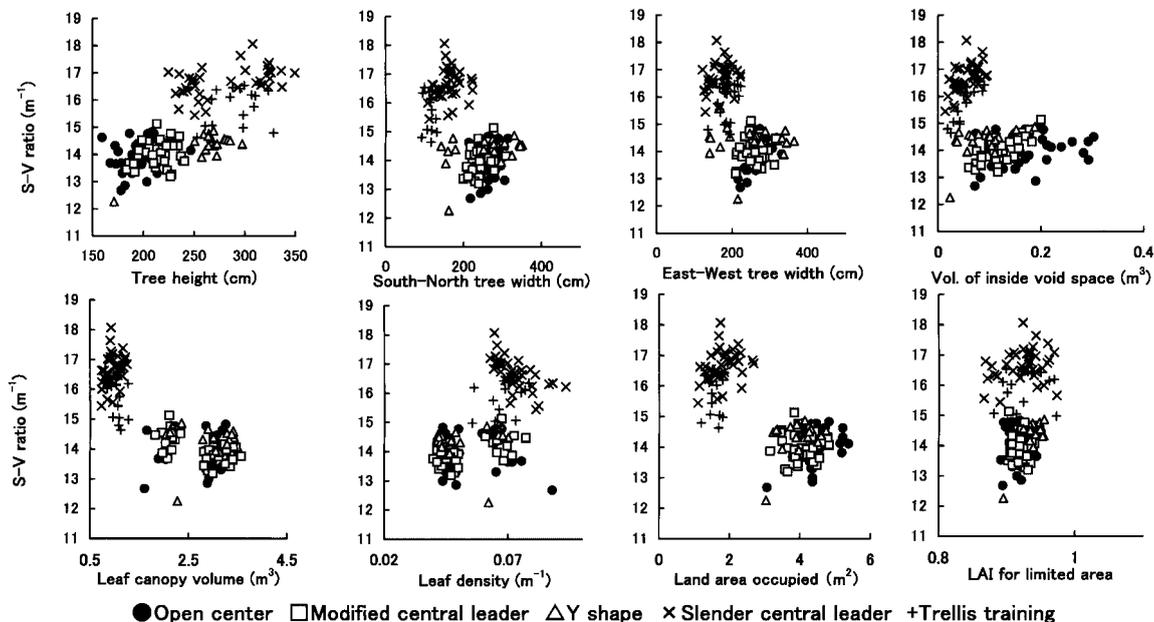


Fig. 14. Relations between mean values for 20 years of yearly S-V ratio and that of several yearly crown information from CACOAS.

れた（第10図）。同一樹形群内に限れば、第4表に示された相関関係は見出されなかった（第14図）。したがって、この場合には同一樹形群内における骨格枝配置の違い（第2表）がS-V比に影響したものの（第5表）と推察される。ただし、同一樹形群内におけるほぼ似た不定形立体におけるS-V比の違いの理由を骨格枝配置の違いから抽出することは困難であった。

2. 薬滴付着量分布シミュレーションに必要なパラメータ

1) 水平方向および鉛直方向の薬滴減衰係数 (Kh および Kv)

既報（山本ら、1990）において調査された‘ラフランス’葉の月別の傾斜角度平均値、分散値、ベータ分布のパラメータである λ および ν の値を用いて、水平方向の薬滴粒子量減衰係数 (Kh) および鉛直方向の薬滴粒子量減衰係数 (Kv) を計算した（第6表）。本シミュレーションではこれらのうちから、7月と8月の平均値を用いた。すなわち、Khとして0.566、およびKvとして0.772を用いた。

2) 噴出口からの相対的距離を用いて鉛直方向に方向転換する薬滴粒子量の割合を推定するためのパラメータ

モデル実験結果から、実験装置（第7図）の噴出し口からの距離が増大するにつれて落下水滴量は増大し、ある距離においてピークに達し次第に減少した（第15図）。散布粒子径が均一で、かつ、散布角度が同一であれば、ノズル噴霧力の大小により粒子の運動エネルギーが増減し、空気摩擦抵抗や浮力を無視すれば方物体の飛距離は6式により決まる。すなわち、第15図とは異なり、すべての粒子が同一点に落下する。

$$X = 2 u_0 v_0 / g \quad (6)$$

ここで、 u_0 と v_0 はそれぞれ初速度 V_0 の水平方向速度成分と鉛直方向速度成分、 g は重力加速度（ $=9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ）であり、 $V_0^2 = u_0^2 + v_0^2$ の関係がある（宮島、1990）。6式より初速度 V_0 で斜め上に角度 A 度で噴射される薬滴の到達距離 X は $\tan A = v_0 / u_0$ の式によって u_0 と v_0 を求めることで計算される。

しかし、実際には空気摩擦抵抗と浮力の影響が加わる。空気摩擦抵抗により粒子の運動エネルギーは飛距離が増すにつれて減少するとともに、水平方向の移動速度は低下し、浮力や重力に影響されやすくなる。空気摩擦抵抗

Table 6. Distribution of leaf inclination angles (mean and variance, unit : degree) to horizontal plane of a pear 'La France', parameters (λ and ν) of beta distribution as its approximation and extinction coefficient (K) of parallel stream at $h_0=90$ degree (upper), and that of a case of distribution of "leaf inclination angles" to vertical plane (lower)

	Month	Mean	Variance	λ	ν	K^2
Leaf inclination angle to horizontal plane	May	50.2	354.5	2.58	2.05	0.606
	June	53.7	268.6	3.73	2.53	0.568
	July	53.1	247.8	4.07	2.83	0.577
	Aug.	54.4	312.3	3.14	2.06	0.555
	Sept.	55.6	270.4	3.75	2.32	0.541
"Leaf inclination angle" to vertical plane	May	39.8	354.5	2.05	2.58	0.727
	June	36.3	268.6	2.53	3.73	0.773
	July	36.9	247.8	2.83	4.07	0.770
	Aug.	35.6	312.3	2.06	3.14	0.775
	Sept.	34.4	270.4	2.32	3.75	0.792
Oct.	35.9	251.7	2.68	4.04	0.780	

² K denotes K_h in the upper and K_v in the lower.

は粒子の速度と粒子径に比例するので、粒子径が大きく、高速ほど空気摩擦抵抗が大きくなり、粒子の運動エネルギーの減少分は大きくなり、落下しやすい。浮力はアルキメデスの原理より、粒子が押し上げた空気のみだけの重力相当分を鉛直上向きに受けるので、小さい重力を受けている小粒の粒子ほどその影響を受けやすいものと考えられる。したがって、粒子径が不均一な場合、上記の摩擦抵抗や浮力の違いにより、落下点のばらつきが生じるものと考えられる。SSからの散布粒子径範囲は60~150 μ 、動力噴霧器からの散布粒子径範囲は10~200 μ であることが知られているが(安田, 1966)、本実験で用いた電動噴霧器の散布粒子径範囲は不明であるものの、ほぼ似たものと思われる。第15図には粒子径の違いや噴射角度の違いなどの要因により、運動エネルギーを喪失したもののほど早く落下し、そうでないものは遠くまで飛散したことを示す。同時に、途中落下するので、距離が長くなるほど飛散粒子量も次第に減少し、落下する粒子量も減少した(第15図)と考えられる。

第15図のデータから、鉛直方向に方向転換する薬滴粒子量の割合を算出した。飛散した水滴重量に対する落下

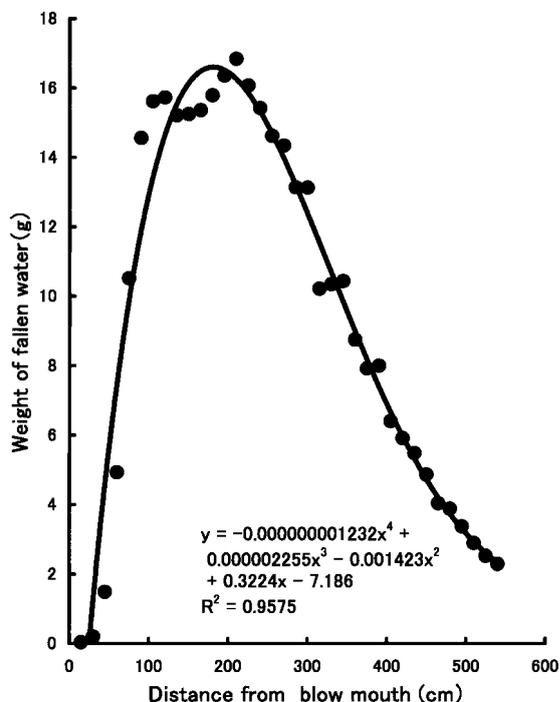


Fig. 15. A relationship between distances from a blowing mouth and weights of falling water in a model test for flight-distance of atomized water droplet.

した水滴重量の割合(< 1)を距離ごと計算し、さらに、距離を相対距離に変えて、両者の関係を示したのが第16図である。実際には、モデル実験では調査できなかった僅かな飛沫がもっと遠くに飛んだものと考えられたので、第16図の横軸は測定された最大到達距離を相対距離95%とみなしたものである。相対距離の6次までのべき乗値による落下水滴粒子量の割合の推定多項式が得られ、その決定係数は約0.97であった(第16図)。

3) 慣行栽培における薬滴付着量

室内の検定実験結果から計算した薬滴付着量と2値化画像における面積率(%)の関係を示した。黒板上の飛沫分布域面積の計測誤差が大きかったことから、散布図はばらついたが、直線回帰式の決定係数は約0.72で式は有意であった。この回帰式を用いて、SS方式およびノズル方式による慣行的散布におけるクレフノン付着量を推定したところ、平均値±標準偏差は、それぞれ、 $0.00913 \pm 0.00293 \text{ gcm}^{-2}$ および $0.00988 \pm 0.00333 \text{ gcm}^{-2}$ であり、両者は近似したが、ノズル方式の方がわずかに多かった(第17図)。

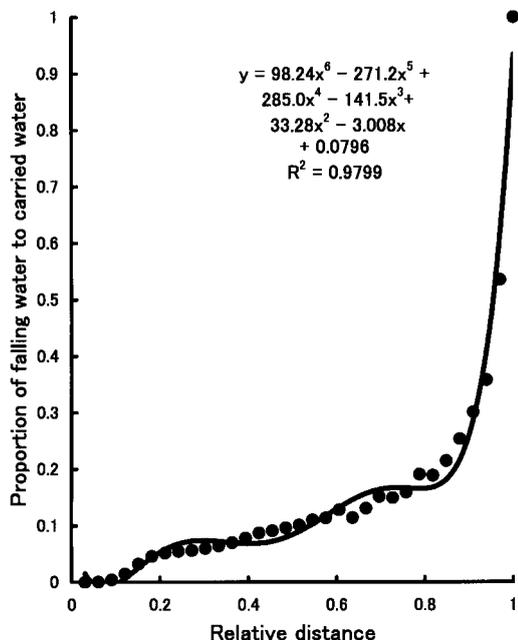


Fig. 16. A relation between weight proportion of falling water to carried water in the air and relative distance to the maximum range of carried water.

3. 薬滴付着量のシミュレーション結果

1) シミュレーション結果の樹形群間比較

各年の薬滴付着量の平均値，最大値，最小値および標準偏差のそれぞれ20年間平均値を樹形群間で比較したところ，全体を通じて相当の差異が見られた（第18図A）．また，この4者は総じて似た大小関係を示した．最小値は約 0.004 gcm^{-2} 以下に分布し，最大値は約 0.02 gcm^{-2} 以上に分布し（第18図A）．両者間に大きな開きがあった．また，平均値は約 0.01 gcm^{-2} を上下しており（第18図A），2.3）に記した慣行栽培における薬滴付着量に近似した．このことから，本シミュレーション中には原理上の大きな誤謬が含まれなかったものと筆者らは考えている．同一樹形群内における上記数値の変動が大きかったため，樹形群間比較はやや困難であったが，薬滴付着量は総じてY字形，トレリス誘引仕立ておよび変則主幹形の一部で大きく，細形主幹形や開心形で小さかった．付着むらの指標としての変動係数（20年間平均値）は全体を通じて約0.5を上下しており，トレリス誘引仕立てがやや小さかったものの，他の樹形群では同一樹形内における違いが目立った（第18図B）．薬滴付着量の増大

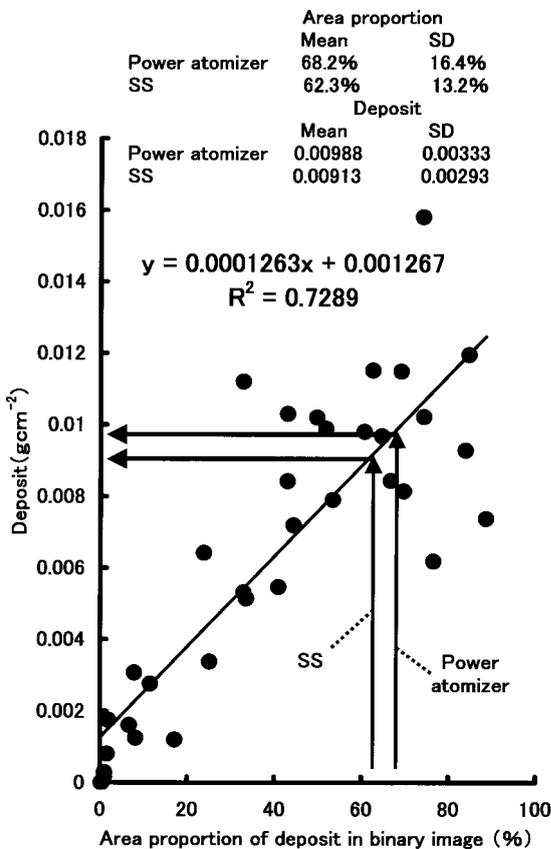


Fig. 17. A Relation between area proportions of deposit in binary images and amounts of deposit (lower). The mean and the standard deviation (SD) of deposits in orchards (upper) were estimated by an equation shown in the figure and area proportion in images after a spray by a sprayed sprayer (SS) or a power atomizer.

をもたらす主な要素として南北樹幅制限長×東西樹幅制限長の組み合わせに注目される．付着量については，開心形では総じて $5.33 \text{ m} \times 3 \text{ m} > 4 \text{ m} \times 4 \text{ m} > 3 \text{ m} \times 5.33 \text{ m}$ の関係が推察され，変則主幹形およびY字形では総じて $5.33 \text{ m} \times 3 \text{ m} > 4 \text{ m} \times 4 \text{ m} = 3 \text{ m} \times 5.33 \text{ m}$ の関係が推察され，トレリス誘引仕立てでは総じて $4 \text{ m} \times 2 \text{ m} > 2.83 \text{ m} \times 2.83 \text{ m}$ の関係が推察され，細形主幹形では総じて $3 \text{ m} \times 3 \text{ m} > 2.25 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ の関係が推察された（第2表および第18図A）．このことはSSからの薬滴流方向に対して葉層が薄く広がる樹冠形ほど葉面の付着量が増え，反対に，薬滴流方向に対して葉層が厚く，ズングリした樹冠形ほど葉面の付着量が減ることを示唆する．後者の

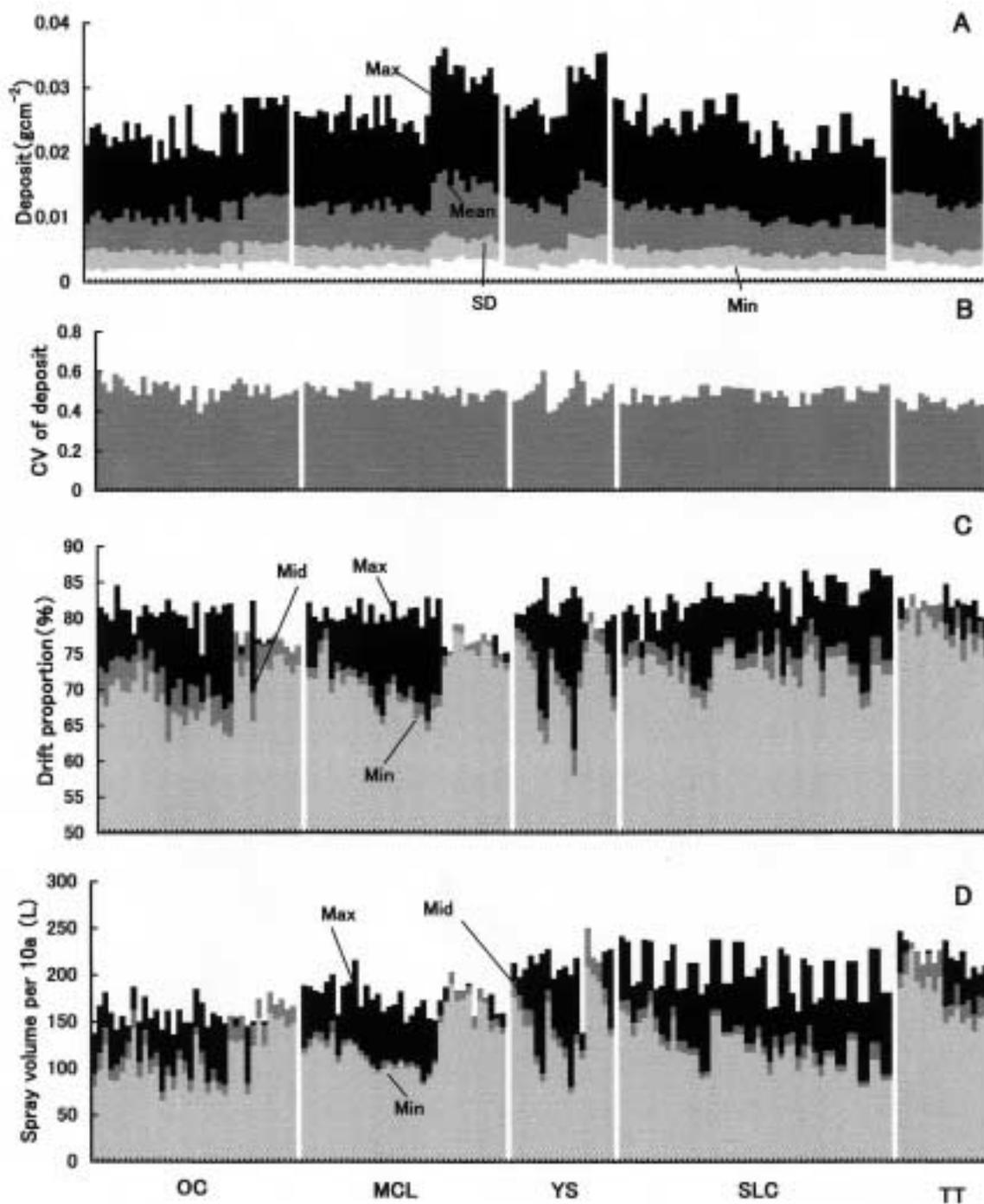


Fig. 18. Mean values for 20 years of yearly deposits(A), yearly coefficients of variation(CV) of deposits(B), yearly drift proportions(C) and yearly spray volumes per 10a(D) in five tree form groups in which each tree form arranged in order of tree form number. Abbreviations of tree form group refer to Fig. 10.

樹冠ほど、樹冠が厚く、南北樹幅および樹高は小さくなった。細形主幹形およびトリス誘引仕立てにおける主枝数の違いによる影響は明らかでなかった。なお、開心形、変則主幹形およびY字形の主枝数はその性格上1種類であった(第1表および第2表)。さらに、第1主枝発生方角の違いによる影響についても明らかでなかった(第18図A)。

各年の樹冠外漂流量割合の最高値、中間値および最低値(いずれも20年間平均値)は、それぞれ、約75%から約86%、約62%から約83%、および、約58%から約81%に分布し(第18図C)、筆者らの予想をはるかに上回っていた。

各年の10a当たり散布量の最大値、中間値および最小値(いずれも20年間平均値)を樹形群間で比較したところ(第18図D)、それぞれ、約140Lから約250L、約90Lから約250L、および、約65Lから約230Lに分布し、樹形によって大きく異なった。材料および方法で記したように、最小散布量は樹冠の厚さ×南北樹幅×東西樹幅制限長の値に比例し、中間散布量は樹高×南北樹幅×東西樹幅制限長の値に比例することを考慮すると、樹冠の厚さや南北樹幅あるいは樹高が増大すれば、その分だけ散布量も増えたことになる。

SS方式における10a散布量を左右する上記以外の要因として東西樹幅制限長の違いから生じるものがある。東西樹幅制限長が短ければ10a当りの樹列数が増え、SSの往復回数も増えるので、散布対象外になるSS走行部分だけ10a散布量が目減りするからである。正確に言えば、第3図上に示したように、本シミュレーションにおける散布幅は、往復とも、園道中心線よりSS半径(0.5m)だけ離れた点と東西樹幅制限区域の反対側の端までを結ぶ距離であった。つまり、上記散布幅のうち東西樹幅制限区域は重複散布となったが、残りの部分は片道散布であった。この片道散布の部分だけ10a当たり散布量が目減りする可能性がある。材料および方法で記したように、10a当たり設定散布量を350Lとしたが、この設定値は樹高が一律3.5mで、上記のSS走行部分を無視したときの値であった。したがって、樹高が一律3.5mのまま、片道散布の部分だけを減らしたときの10a当たり散布量を(東西樹幅制限長+0.5×園道幅-0.5m)/(東西樹幅制限長+園道幅)×350Lの式で算出した。その結果、東西樹幅制限長が5.33m(30樹)、4m(30樹)、3m(78樹)、2.83m(8樹)および2m(8

樹)のとき、10a当たり散布量は、それぞれ、269L、263L、252L、251Lおよび233Lになった。また、3mのときの252Lを基準に、このときの誤差を計算すると、それぞれ、+6.7%、+4.3%、±0%、-0.4%および-7.5%であった。これらの誤差は園地の樹割り当て面積率を同じにするために園道幅を自由に設定できなかったこと、および、SS噴霧部半径(0.5m)が固定長であったことから発生したものであり、本シミュレーションにおける不可避の誤差であった。とは言え、この計算結果は樹高が一律3.5mとした場合の特殊数値であり、また、シミュレーション結果(第18図D)に現れた変動の大きさに比べて非常に小さかった。

2) 154樹形におけるシミュレーション結果の序列

各年の薬滴付着量の最大値、平均値、最小値、標準偏差および変動係数(いずれも20年間平均値)を大きさ順に並べ(第19図AおよびB)、154樹形中の1位の値と154位の値の差が1位の値に占める割合を調査したところ、それぞれ、約52%、約49%、約62%、約18%および約35%であった。ほぼ等しい割り当て土地面積当たりLAIにもかかわらず、各年の平均薬滴付着量の20年間平均値において154樹形中で約49%の差異が生じたことは重大である。

上記同様に、樹冠外漂流量割合の最高値、中間値および最低値(いずれも20年間平均値)を大きさ順に並べ(第19図C)、最大差異の割合を調査したところ、それぞれ、約16%、約26%および約28%であった。

最後に、10a当たり散布量の最大値、中間値および最小値(いずれも20年間平均値)を大きさ順に並べ(第19図D)、最大差異の割合を調査したところ、それぞれ、約45%、約69%および約71%であり、極めて大きい差異が存在した。

3) 薬滴付着量の範囲、漂流量割合および10a当たり散布量の年次変動

2)はいずれの項目についても20年間の平均値の序列を示したものであった(第19図)。減農薬への対策は果樹の生長過程や樹齢に対応しながら立てる必要があるので、これらの集計の元になったシミュレーション出力データの年次変動を検討する必要がある。そこで、薬滴付着量の最大値、平均値、最小値、標準偏差および変動係数、樹冠外漂流量割合の最高値、中間値および最低値、および、10a当たり散布量の最大値、中間値および最小値について、第19図の中で示したそれぞれの20年

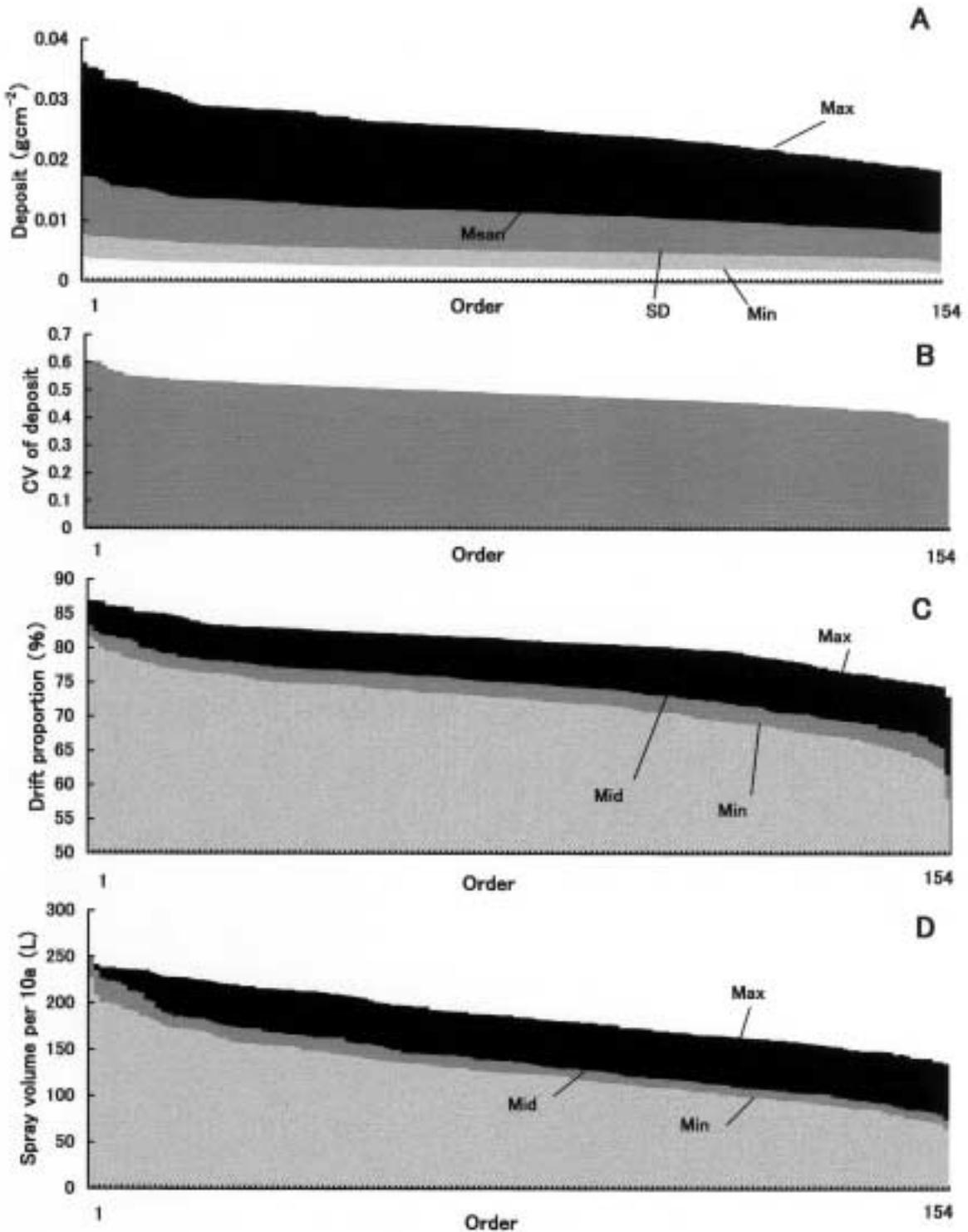


Fig. 19. Mean values for 20 years of yearly deposits(A) yearly coefficients of variation(CV)of deposits(B) yearly drift proportions(C)and yearly spray volumes per 10a(D). In each "y" axis(order), tree forms were arranged in order of each value in the 154 tree forms.

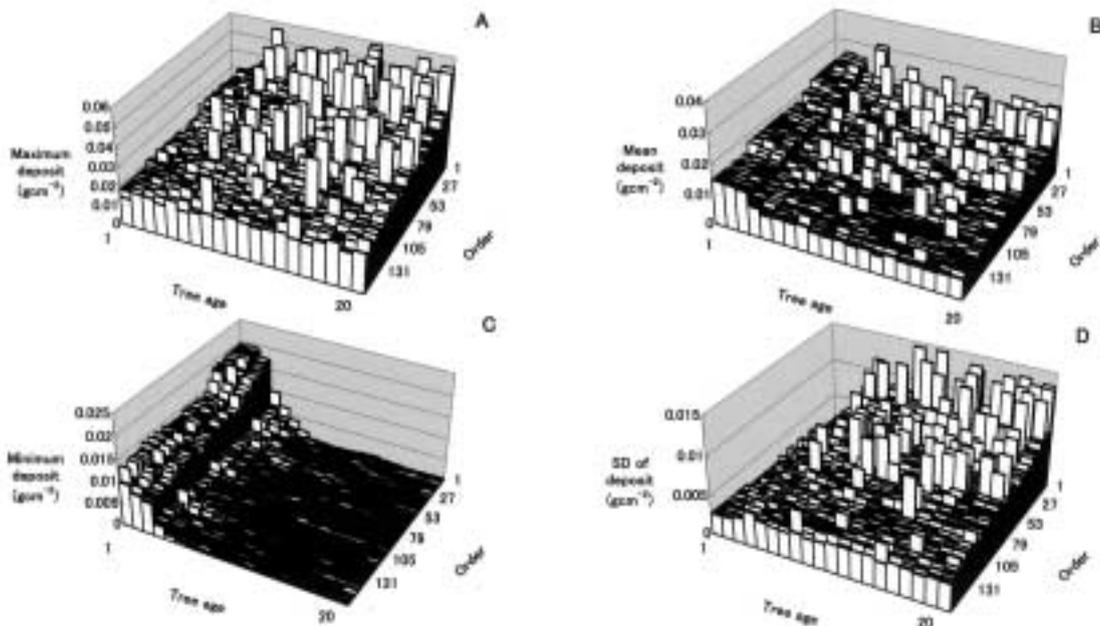


Fig. 20. The yearly values of maximum deposits(A), mean deposits(B), minimum deposits(C)and the standard deviations(SD)of deposits(D). In each "y" axis(order), tree forms were arranged in order of each value in the 154 tree forms.

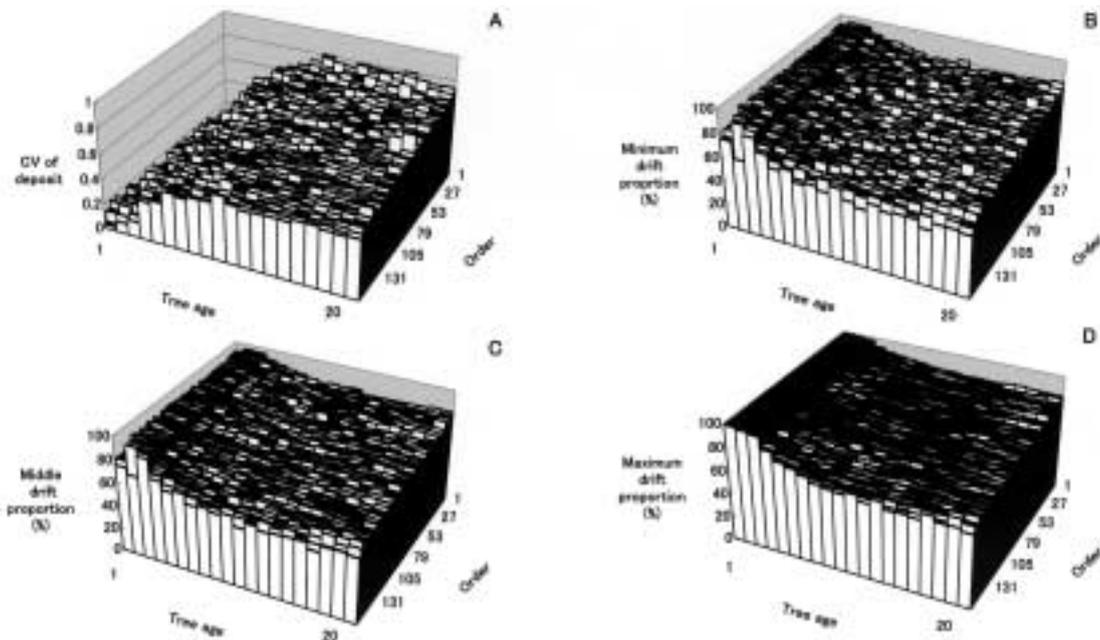


Fig. 21. The yearly values of coefficient of variation of deposit(A), minimum drift proportion(B), middle drift proportion(C)and maximum drift proportion(D). In each "y" axis(order), tree forms were arranged in order of each value in the 154 tree forms.

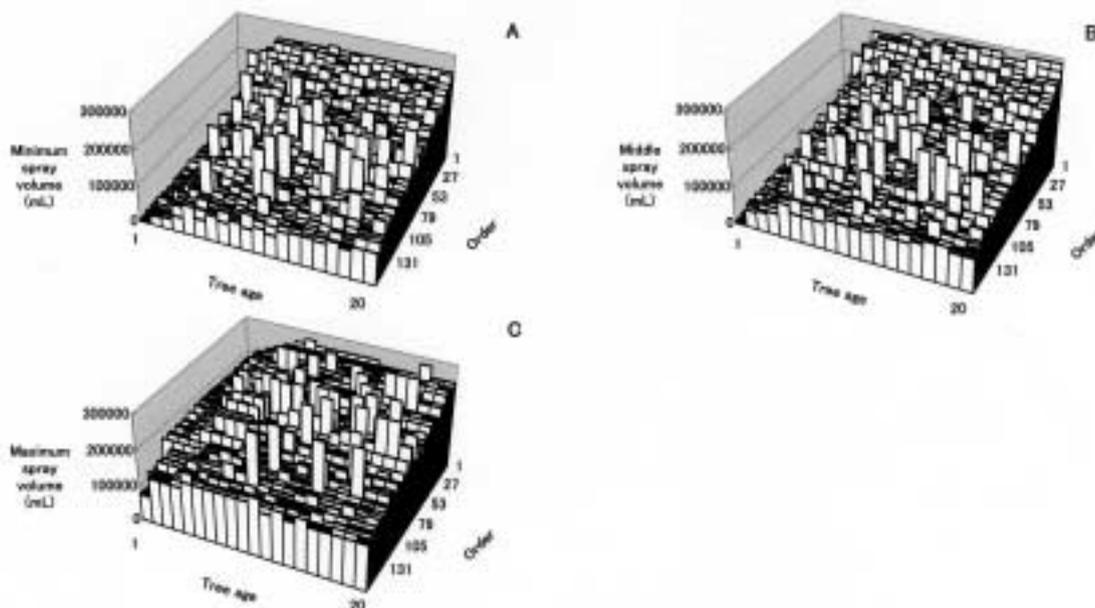


Fig. 22. The yearly values of minimum spray volume per 10 a (A), middle spray volume per 10 a (B) and maximum spray volume per 10 a (C). In each “y” axis (order), tree forms were arranged in order of each value in the 154 tree forms.

間平均値の大きさ順に並べたときの年次変化を示した(第20図, 第21図および第22図)。樹齢の若い時期における急速な果樹の生長や樹冠の拡大, その後に続く割り当て土地面積当り LAI 調節のための整枝剪定により, 枝葉の空間分布は大きく年変動した。これらが薬滴付着量に影響したものと考えられる。薬滴付着量の最大値, 標準偏差および変動係数は樹齢とともに増大したが(第20図AおよびDおよび第21図A), 平均値と最小値は樹齢とともに減少した(第20図BおよびC)。樹形によっては, 樹齢が6, 7年目あたりから, 最大値, 平均値および標準偏差がときどき急増した(第20図A, BおよびD)。これは樹冠形の年変動を通じて, 薬滴流の過度に集中する樹冠部位が年により形成されたことを示唆する。最小値が樹齢5年目頃から急減した(第20図C)ことは, 樹齢5年以前において薬滴が満遍なく付着したものの, その後, 葉量の急増に伴い, SSからの薬滴流にとっての死角部位が発生したことを意味する。ただし, 上記の最大値や最小値は極値であり, 21^3 個の立方体ブロック中1個存在すればデータとして出力されるものであった。一方, 薬滴付着量の変動係数(第21図A)は樹冠全体の付着むらの統計的指標として役立つ。変動係数は樹齢とともに急増し, 樹齢6年目あたりから0.5付近を維持した(第

21図A)。

樹冠外漂流量割合の最高値, 中間値および最低値の年次変動(第21図B, CおよびD)は, 樹齢の進行に伴いやや低下する傾向が見られた。樹冠外漂流量割合は数値が割合であったこと, および, その割合が全体的に高かったことから, 年次変動そのものは目立たなかったものと考えられる。また, 樹齢が低いとき, 中間値や最高値は極めて高く, ほとんどの薬滴は樹冠外に漂流されたことを示している(第21図CおよびD)。

10a 当たり散布量の最大値, 中間値および最小値は総じて樹齢の進行に伴い増大した(第22図)。ただし, 20年間の平均値の順位に関係なく, これらは樹形によって大きく年変動するものが見られた。この原因として, 上記3種類の10a 当たり散布量が各樹形における毎年の樹高, 樹冠厚さ, および南北樹幅の実際値に直接影響されたことが考えられる。

4) 慣行付着量に是正したときのシミュレーション結果の解析

3) までの結果はシミュレーション実験結果であり, 樹形によっては薬滴付着量の平均値と慣行付着量との間に相当の違いが認められた(第18図A)。また, 10a 当たり散布量に関するこれまでの比較論議の中では薬滴の過

剰付着の問題を言及しなかった。加えて、多くの樹形において平均付着量が慣行付着量より大きかった。そこで、上記の過剰付着の問題と1)に記した東西樹幅制限長の違いからもたらされる10a当り散布量の違いの問題も同時に解決すべく以下の計算処理を施した。すなわち、シミュレーション実験結果における各年の薬滴付着

量の平均値をSS散布時に経験的に見出された慣行的付着量($0.009137 \text{ gcm}^{-2}$, 第17図)で割ったときの値(以下、基準化係数, coefficient of STD)を、各年の薬滴付着量の最大値, 最小値および標準偏差, および、各年の10a当り散布量の最大値, 中間値および最小値のそれぞれに乘じた。これらの元の値に上記基準化係数を乗

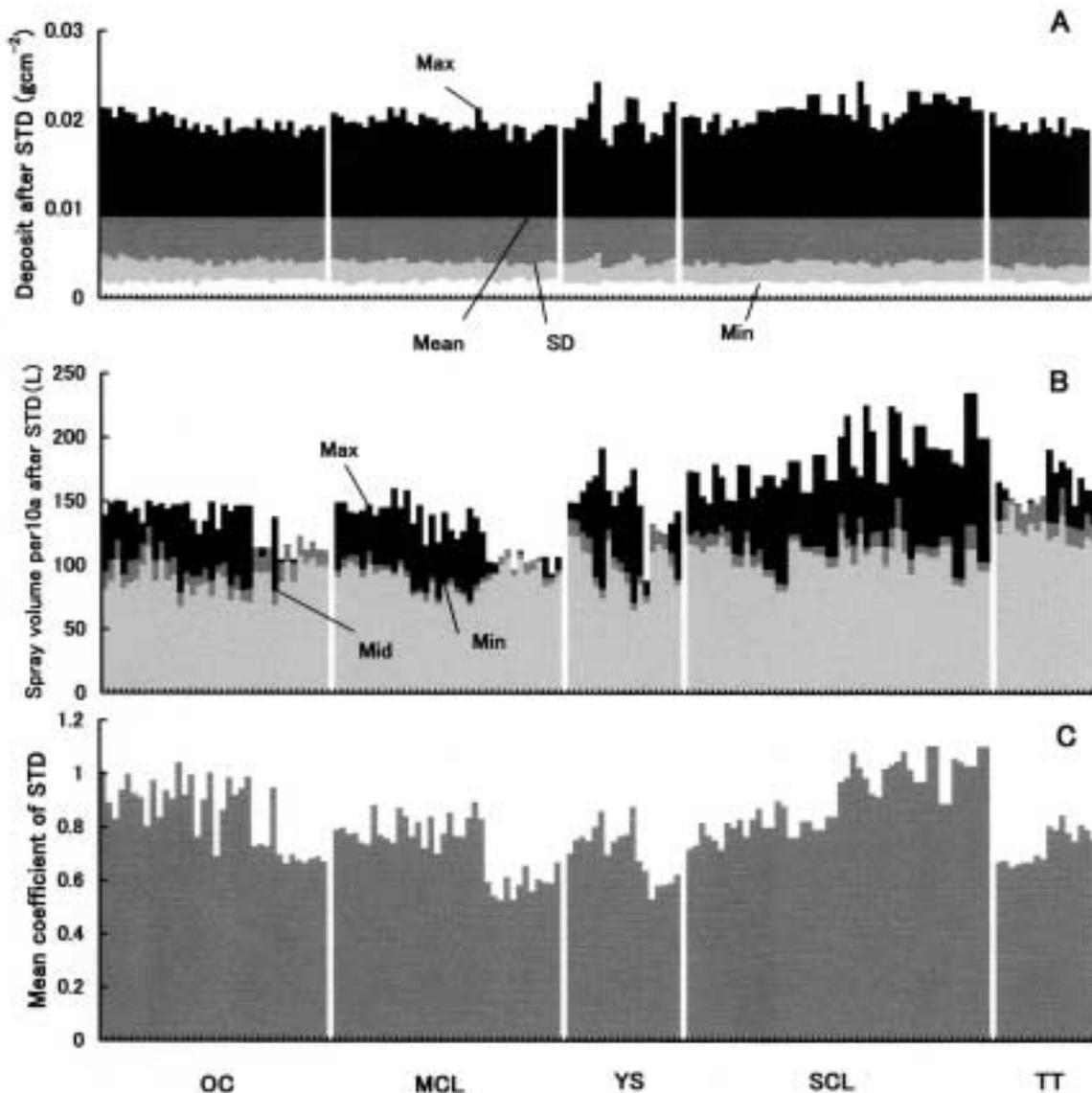


Fig. 23. Mean values for 20 years of yearly deposits after the standardization by the practical deposit(STD \times A) yearly spray volumes per 10a after STD(B) and mean coefficients of STD(C) which is equal to(spray volume per 10a after STD at B in the figure)/(spray volume per 10a before STD at D in Fig. 18). In five tree form groups, each tree form was arranged in order of tree form number. Abbreviations of tree form group refer to Fig. 10.

Table 7. The tree form numbers(Table 2)which were arranged to become advantageous for reducing pesticide use with respect to the next three items; SVAST(mean values for 20 years of yearly minimum spray volume per 10 a after STD, MDBST(mean values for 20 years of yearly mean deposit before STD)and CVBST(mean values for 20 years of yearly coefficient of variation of deposit before STD) STD refers to Fig. 23.

Order	SVAST	MDBST	CVBST	Order	SVAST	MDBST	CVBST	Order	SVAST	MDBST	CVBST
1	311	227	119	53	229	302	506	105	437	412	235
2	113	229	307	54	210	405	206	106	438	211	423
3	128	314	503	55	236	516	133	107	435	311	424
4	222	226	504	56	112	209	408	108	403	416	121
5	217	232	511	57	436	417	430	109	314	207	216
6	124	315	308	58	207	418	412	110	303	441	437
7	313	230	510	59	226	116	128	111	419	442	438
8	215	316	432	60	231	213	214	112	420	102	311
9	123	235	431	61	126	221	409	113	445	223	207
10	121	317	515	62	119	303	417	114	446	415	421
11	306	234	229	63	309	410	418	115	316	117	422
12	118	225	407	64	125	309	205	116	514	112	403
13	221	233	314	65	127	220	227	117	433	107	228
14	115	228	434	66	447	404	406	118	426	431	443
15	213	318	512	67	448	208	108	119	407	114	439
16	220	313	116	68	208	310	110	120	430	122	440
17	214	503	402	69	209	203	405	121	108	430	419
18	415	231	516	70	232	218	215	122	404	106	420
19	223	504	513	71	308	204	135	123	431	111	204
20	416	130	120	72	202	512	134	124	513	104	202
21	122	133	401	73	423	201	233	125	402	123	106
22	101	236	507	74	424	510	303	126	441	128	224
23	104	505	508	75	411	515	435	127	442	425	118
24	218	506	404	76	409	421	436	128	405	437	447
25	234	501	502	77	211	422	505	129	512	438	448
26	444	136	425	78	135	202	130	130	401	109	115
27	116	312	410	79	317	408	225	131	315	429	415
28	305	502	309	80	204	413	231	132	410	121	129
29	318	132	441	81	432	414	223	133	516	426	131
30	443	508	442	82	136	305	230	134	417	124	416
31	114	134	122	83	408	108	433	135	418	115	112
32	312	135	232	84	107	509	445	136	307	105	125
33	219	119	411	85	227	514	446	137	509	118	127
34	310	307	301	86	427	403	317	138	515	101	305
35	235	507	117	87	206	407	103	139	406	436	318
36	117	129	514	88	412	214	427	140	302	432	211
37	105	131	221	89	133	419	426	141	510	428	102
38	129	217	213	90	130	420	203	142	301	445	201
39	224	301	501	91	203	409	444	143	505	446	212
40	131	406	316	92	233	103	304	144	501	433	111
41	216	401	220	93	103	224	236	145	428	113	210
42	102	215	302	94	230	411	124	146	507	444	113
43	109	125	509	95	110	222	107	147	504	434	313
44	111	127	132	96	134	110	123	148	425	443	126
45	225	402	315	97	228	216	429	149	434	427	105
46	106	206	310	98	439	423	222	150	506	435	109
47	120	126	217	99	440	424	209	151	508	447	104
48	205	210	218	100	132	212	136	152	502	448	312
49	212	205	428	101	421	511	219	153	511	439	306
50	201	308	226	102	422	219	234	154	503	440	101
51	413	513	413	103	429	306	208				
52	414	304	414	104	304	120	114				

ずることは、シミュレーション実験におけるノズル噴霧量がこの基準化係数倍になることを意味する。上記以外の出力項目である各年の薬滴付着量の変動係数、樹冠外漂流量割合の最高値、中間値および最低値はいずれもこの乗算によっても不変である。以下、この基準化係数を乗じることを、「慣行付着量で基準化する」と記す。

慣行的付着量で基準化したときの各年の薬滴付着量をもとに、20年間平均値としての最大値、平均値、最小値および標準偏差を算出して樹形群間比較を行ったところ（第23図A）、当然ながら平均値は等しくなり、第18図Aに比べて20年間の最大値、最小値および標準偏差の多くは減少したが、一部には増大したものもあった。

第23図Bは基準化したときの各年10a当たり散布量の最大値、中間値および最小値の20年間平均値について樹形群間比較を行ったものである（第23図B）。基準化前の10a当たり散布量（第18図D）の大小と樹形群との関係については既に1)で考察したが、基本的に同じ関係が第23図Bの背景として存在したことは否定できない。しかし、第23図Bのデータには、薬滴付着量が慣行

付着量になるように、樹形ごと、年ごとの調節が新たに加えられ、20年間平均されたものであり、基準化前のグラフ（第18図D）に比べて様相を異にした。多くの樹形において、第18図Dの散布量より第23図Bの散布量が少なかった。よって、前者に対する後者の比率（第23図C）は、過剰付着をさけるべく、樹形ごと、年ごと、散布時にノズル噴霧量を調節した場合の20年間の平均的減農薬効果を表し、この比率が小さいほど減農薬効果が大いことを意味する。適正な薬滴付着量の平均値になるように、樹形ごと、年ごと、上記の比率でノズル噴霧量を調節すれば、細形主幹形の一部を除く多くの樹形で、当初の調節前ノズル噴霧量を用いた散布に比べ、最大約40%以下の減農薬が見込まれることになる。

次に、慣行的付着量で基準化したときのシミュレーション結果の154樹形における序列を比較したい。各年における基準化後の薬滴付着量最大値、最小値および標準偏差（いずれも20年間平均値）をそれぞれの大きさ順に並べたとき（第24図A）の154樹形中の1位の値と154位の値の差が1位の値に占める割合は、それぞれ、約30%、

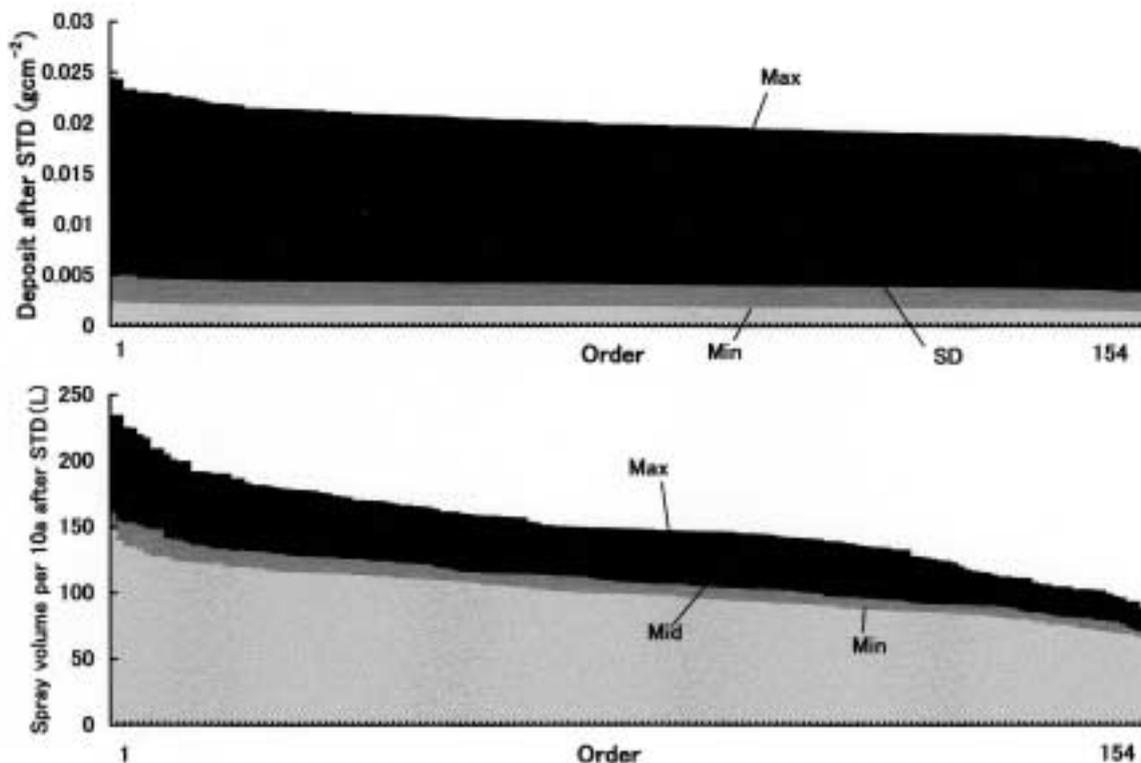


Fig. 24. Mean values for 20 years of yearly deposits after STD (A) and yearly spray volumes per 10 a after STD (B). Tree forms were arranged in order of each value in the 154 tree forms. STD refers to Fig. 23.

約34%, および, 約39%であった。同様に, 各年の基準化後 10 a 当たり散布量の最大値, 中間値および最小値(いずれも20年間平均値)を大きさ順に並べたとき(第24図B)の最大差異の割合は, それぞれ, 約62%, 約56% および約56%であり, 極めて大きい差異が存在した。ここで強調すべきことは, LAI がほぼ等しい154樹形中において, ノズル噴霧量の調節を通じて薬滴付着量の平均値が慣行的付着量になるようにしたときにおいても上記の大きな差異が存在したことである。いいかえれば, 上記の大きな差異を生じた主たる原因が樹冠形の違いであり, 樹形選択による減農薬の大きな可能性を示唆するものである。第7表には, いずれも20年間平均値としての, 基準化後の 10 a 当り最小散布量の小さい順の樹形番号, 基準化前薬滴付着量の平均値の大きい順の樹形番号および基準化前薬滴付着量の変動係数の小さい順の樹形番号を記したものであり, この順番はいずれも減農薬にとって有利な序列である。また, 第7表と樹形構築の選択肢(第2表)との照合は減農薬樹形選抜のために役立つだろう。

5) 慣行的付着量で基準化したときのシミュレーション結果の年次変動

基準化後のデータを用いて, 第24図に記した各項目の

20年間平均値の順位に並べて表示した年次変動(第25図および第26図)と基準化前の同じ関係の図(第20図および第22図)を比較した。その結果, 年変動が大きかった基準化前薬滴付着量の最大値, 標準偏差, 10 a 当りの最大散布量, 中間散布量および最小散布量の年変動は基準化によりいずれも大きく減少し, 全体に滑らかになった(第25図および第26図)。

4. 減農薬樹冠に関する総合考察

本研究では, 同じ154樹形を対象に, S-V 比解析機能を追加した CACOAS および薬滴付着量の2種類のシミュレーションを行なった。よって, ここでは, S-V 比の結果, 薬滴付着量関連の結果および CACOAS による樹冠解析結果との相互関係を解析し, 減農薬樹冠実現のための方策を総合考察したい。上記3者の出力結果の総当たり相関行列を算出し, この中から慣行付着量による基準化前および基準化後の 10 a 当たり散布量と基準化前の薬滴付着量に関連するもの限定して, S-V 比関連の数値および CACOAS からの樹冠解析結果などとの間の相関係数を抜粋した(第8表)。なお, S-V 比関連の数値と CACOAS からの樹冠解析結果との間の相関関係については, 1.4)に記したので, ここでは省略する。

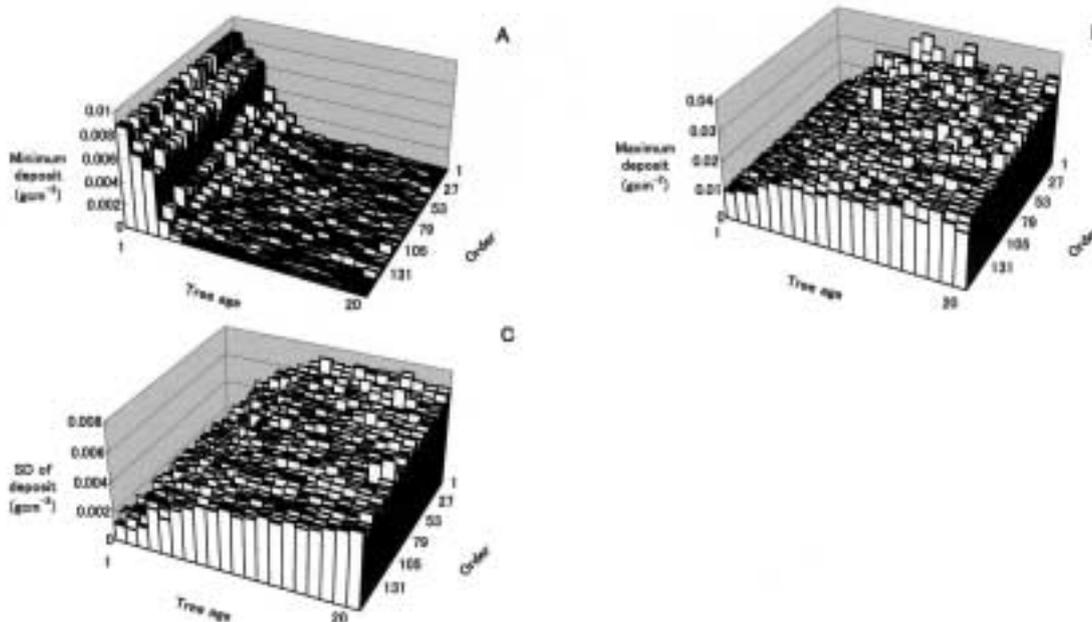


Fig. 25. The yearly values of minimum deposits after STD(A), maximum deposits after STD(B) and standard deviations(SD) of deposits after STD(D). In each "y" axis(order), tree forms were arranged in order of each value in the 154 tree forms.

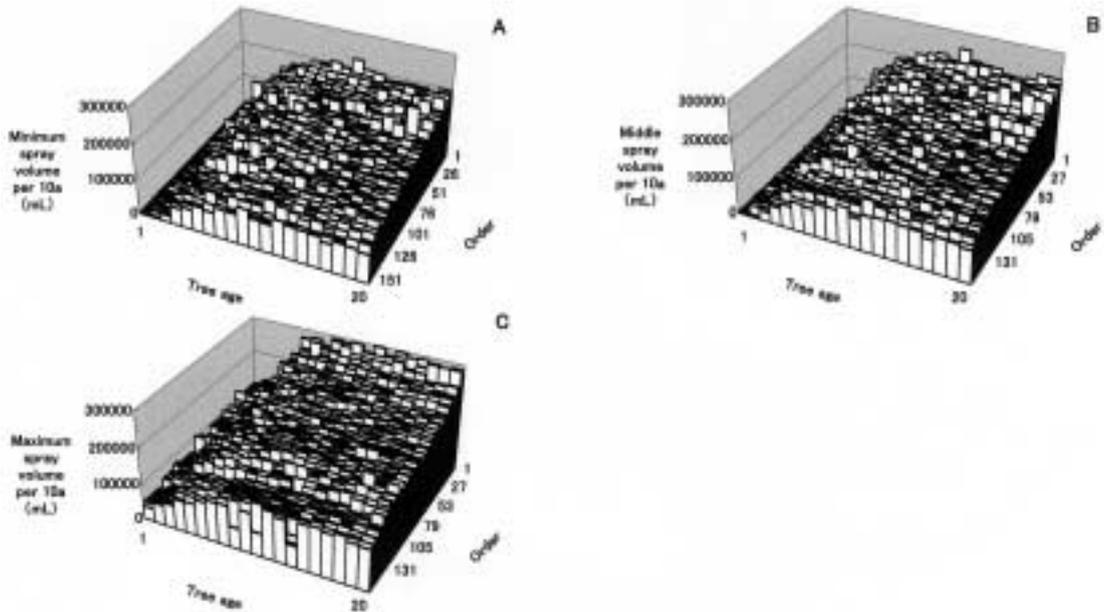


Fig. 26. The yearly values of minimum spray volume per 10a after STD(A), middle spray volume per 10a after STD(B) and maximum spray volume per 10a after STD(C). In each "y" axis (order), tree forms were arranged in order of each value in the 151 tree forms.

以下、個々の実験中に得られた減農薬樹冠実現のために重要と思われる知見をまず列挙するとともに、上記の相関関係について考察する。

最初に強調すべきことは、薬滴の浸入の容易さを示すものと考えられた S-V 比の20年間平均値の序列(第5表)と薬滴付着シミュレーション結果における基準化後10a 当り散布量20年間平均値の序列(第7表)あるいは基準化前平均付着量20年間平均値の序列(第7表)は対応しなかったことである。このことは第8表の相関係数にも表れ、数値の高いほど薬滴浸入が容易であると考えられる S-V 比あるいは垂直 S-V 比と数値が小さいほど減農薬のためには有利と考えられる基準化後10a 当り散布量との間の相関はいずれも正であった。特に慣行付着量による基準化後の10a 当たり散布量との相関は高かった。また、数値の大きいほど薬滴浸入が容易であると考えられる基準化前平均付着量と S-V 比の間には負の相関関係が存在した(第8表)。減農薬樹形の観点から上記の2つのシミュレーション結果は一見矛盾するように映るので、この誤解を解くために最初に考察したい。

S-V 比の解析から、樹冠形の立体的な形態、たとえば、スリムな樹冠はズングリした樹冠より S-V 比が高く、

よって、薬滴が樹冠内部に入りやすいことを推察した(第4表および第13図)。しかし、S-V 比は薬滴付着量や散布量などとは性格上大きく異なる。S-V 比はブロック内葉密度の違いを反映せず、また、全方向からの薬滴の入り易さだけを表す。一方、SS方式における薬滴シミュレーション結果には、散布量や付着量などの定量的結果、樹列に沿った面状散布に限定されること、および、ブロック内葉密度を反映するなどの点で S-V 比とは大きく異なるものと言えよう。10a 当りの葉量が等しい条件下では、スリムな樹冠はズングリした樹冠より樹高が高くなることが多く、SS方式では散布量が多くなるものと考えられる。樹高と3種類の10a 当り散布量の間にはいずれも正の相関が認められ、逆に、SSからの薬滴移動方向に相当する東西方向の樹幅(東西樹幅)の間にはいずれも負の相関が認められた(第8表)。したがって、S-V 比から判断して減農薬に有利であると判断しても、これは一面的な判断にすぎない。では、S-V 比を用いたときの減農薬樹形の序列(第5表)は何を意味しているのか? 一つ考えられることは、ターゲットを定め、葉層に近づき、散布方向を自由に変えながら散布するノズル方式にとって、S-V 比が高い樹冠ほど、その内部に薬滴が入り易く、農薬散布上の無駄が少ない

Table 8. Correlations between crown informations analyzed by the improved CACOAS and the several results from the deposit simulations. Min-SV, Mid-SV and Max-SV indicates mean values for 20 years of yearly minimum spray volume per 10 a after STD, that of the middle one and that of the maximum one, respectively. Mean D, Min-D and Max-D indicates mean values for 20 years of yearly mean deposit before STD, that of the minimum one and that of the maximum one, respectively. SD and CV indicates mean values for 20 years of yearly standard deviation of deposit before STD and mean values for 20 years of yearly coefficient of variation of deposit before STD, respectively. STD refers to Fig. 23.

	Min-SV	Mid-SV	Max-SV	Mean D	Min-D	Max-D	SD	CV
Tree height	0.6432 ²	0.5720	0.7033	-0.0052	-0.0811	0.1363	-0.1580	-0.4097
East-West tree width	-0.5815	-0.5455	-0.5227	0.2142	0.1841	0.2076	0.4039	0.3849
South-North tree width	-0.2389	-0.1940	-0.6577	0.3178	0.2914	0.1001	0.2575	-0.1211
Volume of outside void space	-0.3777	-0.3885	-0.5274	0.4483	0.3857	0.4141	0.4939	0.0500
Volume of inside void space	-0.3648	-0.3012	-0.4880	0.1128	0.1529	0.0289	0.1901	0.1869
Space volume under crown	0.4867	0.4944	0.5602	-0.3528	-0.5119	-0.2591	-0.3557	-0.0275
Leaf canopy volume	-0.5678	-0.5502	-0.7536	0.4760	0.5332	0.3618	0.5247	0.1007
Tree crown volume	-0.5506	-0.5345	-0.7446	0.4753	0.5233	0.3618	0.5191	0.0854
Leaf density	0.3433	0.3328	0.6213	-0.4811	-0.5778	-0.3473	-0.4010	0.1895
Land area occupied by crown	-0.5695	-0.5200	-0.7335	0.3293	0.3574	0.2048	0.4118	0.1855
LAI for limited area	0.2287	0.2456	0.0362	0.1423	0.1370	0.1060	-0.0064	-0.3557
Number of fruits per m ²	0.2678	0.2794	0.1974	0.3092	0.2810	0.3630	0.2568	-0.1110
S-V ratio	0.6036	0.5539	0.7350	-0.5913	-0.6348	-0.4992	-0.5974	-0.0446
Vertical S-V ratio	0.6930	0.6420	0.6904	0.2297	0.2216	0.2688	0.1874	-0.0810
Mean D	0.1532	0.0962	-0.6747	1.0000	0.8990	0.9260	0.8926	-0.2673
Min-D	0.0912	0.0505	-0.6817		1.0000	0.7998	0.7617	-0.2629
Max-D	0.1386	0.0522	-0.5012			1.0000	0.9266	-0.0716
SD	-0.0742	-0.1239	-0.6802				1.0000	0.1772
CV	-0.5208	-0.4949	-0.0435					1.0000
Minimum drift proportion	0.4820	0.4557	0.0509					
Middle drift proportion	0.4885	0.4980	0.0605					
Maximum drift proportion	0.1357	0.1365	0.6770					
Min-SV	1.0000	0.9724	0.3537					
Mid-SV		1.0000	0.3350					
Max-SV			1.0000					

²Significance(n=154): $p < 0.001 (r > 0.3211)$, $p < 0.01 (r > 0.2540)$, $p < 0.05 (r > 0.1946)$.

ことである。第5表に示された154樹形の序列および樹形群間比較結果は、ノズル方式にとっての減農薬樹形の選抜に役だつものと思われる。加えて、ノズル方式のときの樹冠外漂流量は、SS方式に比べ格段に少ないことが考えられる。よって、第5表の序列の高い樹形を対象にノズル方式で散布すれば著しい減農薬効果が期待できよう。ただし、「著しい」と表現するだけで、「どの程度」については現時点では何も言えない。ノズル方式にお

ける付着量や散布量のシミュレーションの場合、必要な変数やパラメータは作業者の多様な判断や行動に依存するため、そのモデルの開発は非常に困難である。

次に強調すべきこととして、SS方式のシミュレーション結果から、樹冠外漂流量割合が非常に高かったことである(第19図C)。現行の果樹栽培にとってSS方式が定着しているだけに、このことは減農薬対策上看過できない。本シミュレーションに用いた年次別目標LAI

はともすれば過繁茂になりやすい実際の栽培圃に比べてやや低く設定されており、この設定値の低さが上記の樹冠外漂流量割合上昇の一要因とも考えられるだろう。しかし、LAIのレベルを少し高めに設定し、その結果、漂流量割合が仮に10%低く見積もられたとしても、減農薬の立場から見れば依然として非常に高いものと考えられる。非ターゲット方式のSS方式では、面状に噴霧された葉滴流は葉層に衝突しないかぎり、その大半はしばらく水平移動を行い、次第に垂直に方向転換するが、鉛直移動の中で葉層に衝突しないかぎり地面に落下し、全て樹冠外漂流分になる。CACOAS出力の樹冠形図から見て、樹高と南北樹幅からなる長方形に占める葉層シルエット部(投影部)の割合、あるいは、南北樹幅と東西樹幅からなる長方形に占める葉層シルエット部(投影部)の割合はさほど高くなく、空隙部分が多い。これらの立方体が南北樹幅制限値や東西樹幅制限値から構成される時は、上記割合はさらに低くなる。したがって、シミュレーション結果の中に現れた樹冠外漂流量割合のレベルの高さには、それ相当の根拠が存在していたものと判断される。日当たり改善のために樹冠内空隙は極めて大きいのが普通である。また、農薬散布の現場を見る限り、SSからの葉滴の大半が葉層に捕捉されないまま漂流することも事実である。つまり、樹冠外漂流量割合が非常に高いことはSS方式特有の散布機構に起因するものと考えられる。ノズル方式は、個々の葉層に照準を当てて散布し、葉層のないところはノズルのコックを閉めて、次の葉層部まで移動するので、樹冠外漂流量は格段に少なくなるものと考えられる。ノズル方式は省力にはならないが、減農薬効果および省エネルギー効果(対動力燃料効果)は高いことから、減農薬対策として今後とも除外できないものと考えられる。

次に、SSの散布方法の工夫による減農薬効果について記す。慣行葉滴付着量による基準化前の10a当り散布量(第18図D)および基準化後の10a当り散布量(第23図B)には、いずれも、SSの散布方法の違いによる歴然たる差が認められた。特に、通常の散布方法と考えられる樹高のみで散布域を調節した場合の散布量(最大散布量)に比べ、樹高と南北樹幅の両者による調節、あるいは樹冠の厚さと南北樹幅の両者による調節の場合には、樹形によっても異なったものの、全体に大きな減農薬効果が推察された。樹高や樹冠の厚さを取り入れた散布域の調節には、SS運転操作部のうち、散布高や散布

角度の調節機構を用いること、および、南北樹幅を取り入れた散布域の調節には走行しながらSS噴霧部の開閉操作を施すことが考えられる。ただし、SS機種によっては、散布操作部の単純なものから複雑なものがあり、各種調節項目が連動するため融通の利かないものもあるだろう。

次に重要なことは、過剰な葉面付着を避けることによる散布量の減少である。実際のSS散布では慣行の10a当り散布量に従っているだけで、この面での注意はほとんど払われない。樹冠内の過剰付着部分を目にしても、樹冠全体として過剰であるかどうかについては把握しがたいためである。本シミュレーション結果より、樹冠全体の平均付着量を慣行付着量に基準化したときの10a当り散布量が、基準化前に比べ最大約40%以下に減少することが明らかになった(第23図C)。ただし、第23図には、一部の樹形において、基準化前より付着量が増えたものもあった。これは当初の付着量が慣行付着量より少なかった場合である。一方、上記減少効果の非常に高い樹形が多数見出されたことは(第23図C)、樹形の違いにより過剰付着が発生しやすいことを示すものである。したがって、このような樹形では、ノズル噴霧量を減らすことで結果的に大きな減農薬効果が得られるものと考えられる。このためには、第23図Cにおける各樹形に見られた比率を参考にして、1式のノズル噴霧量を減らせばよい。計算上、1式の散布幅(L)とSSの走行速度(V)を不変とするので、10a当り設定散布量(G)が修正される。しかし、具体的修正法については必ずしも明確でない。SSの散布操作部には機種によっては単純なものから複雑なものがあり、各種調節項目が連動するため融通の利かないものもあるだろう。たとえば、ノズル噴霧量を変えれば、連動して散布幅も変わる低機能のものもあれば、ノズル噴霧量と風量、したがって、散布幅をそれぞれ独立して調節できる場合もあるう。

上記の樹冠全体における過剰付着にも関連するが、付着むらの問題がある。ただし、付着むらの改善が減農薬に直結することではない。付着むらの改善のためには、第19図Bの変動係数の小さい樹形を選択すれば良い。SS方式の散布機構から見て、SS散布方法の変更だけでは付着むらは改善できないものと考えられる。たとえば、慣行付着量で基準化しても、変動係数自体は不変である。付着むらの範囲については、慣行付着量による基準化前

(第18図A)および基準化後(第23図A)とも、それぞれの最大付着量と最小付着量が参考になるが、これだけでは不十分である。そこで、本シミュレーションには、上記の出力のほかに、各年における葉を含むブロックの平均付着量ヒストグラムを作成するためのデータ(付着量階級別のブロック度数)をファイル出力する機能を備えている。ただし、出力データは膨大であったため、本報では省略した。付着むらの詳細な調査に当っては、このファイルを参照することができる。ノズル方式のときは、S-V比の数値が大きい樹ほど付着むらは減少するものと考えられる。また、ノズル方式では、散布者の目と体により、過剰付着や付着むらを少なくすることも可能であろう。

最後に、CACOASの樹冠解析結果と付着量シミュレーション結果との相関関係から減農薬樹形を考察したい。過剰付着を残したままの10a当たり散布量と樹冠解析結果との間の解析は無意味なので、ここでは慣行付着量による基準化後の10a当たり散布量に限定した。また、付着量を樹冠解析結果に関連させて解析する場合、慣行付着量による基準化後の付着量を用いることはほとんど意味が無いので、基準化前の付着量に限定した(第8表)。基準化後10a当たり散布量はいずれも樹高、樹冠下体積および葉密度との間に正の相関が認められ、反対に、東西樹幅、内部無効容積、葉層体積、樹冠体積および樹冠占有土地面積との間に負の相関が認められた(第8表)。なお、基準化後10a当たり散布量と割り当て面積当りLAIおよび m^2 当り着果数との間の相関は低かった。同様な関係はS-V比との間にも見られている。すでに記したように、基準化後10a当たり散布量とS-V比および垂直S-V比との間に正の相関が認められた。

上記の基準化後10a当たり散布量に関する相関関係から、SS方式では樹冠の寸法、特に樹高が高ければ減農薬に逆行するものと考えられる。逆に、東西樹幅、内部無効容積、葉層体積、樹冠体積および樹冠占有土地面積を増やすことが減農薬に有効であることを意味している。葉密度との間の正の相関は、樹高が高く樹幅の狭い樹冠、いわゆるスリムな樹冠ほど、結果的に葉密度が高くなったことの反映と考えられ、葉密度の上昇そのものが散布量増大の原因であったとは考えにくい。

基準化前の付着量は、外部無効容積、葉層体積、樹冠体積および樹冠占有土地面積に対して正の相関が認めら

れ、これとは反対に、樹冠下空間体積と葉密度との間に負の相関が認められ、樹高との相関は認められなかった(第8表)。これらの相関関係から、SS方式では樹冠内部が疎であるが、樹冠の寸法が大きいほど葉滴付着量が多いこと、および、葉密度が高く、樹冠下空間体積が多いほど、葉滴付着量が少なくなるものと考えられる。また、基準化前の付着量と割り当て面積当りLAIおよび m^2 当り着果数との間の相関は低かった(第8表)。

基準化前の付着量が多いことは、葉滴が浸入しやすいくことを示すだけでなく、基準化したときの減農薬効果が大きいことを意味する。したがって、基準化後の散布量の大小をもたらす要因とともに、基準化前の付着量の大小をもたらす要因は、ともに減農薬にとって重要である。

5. おわりに

CACOASからの出力である樹形(樹冠形)の詳細な違いや剪定過程などの記録データも減農薬樹形の検索にとって本来重要な情報である。しかし、2つのシミュレーションからの出力の分量は、今回、合計約5ギガバイトに達したため、本稿ではこれらの集計は省略した。

緒言に記したように、植え付け当初から骨格枝配置そのものを一新する減農薬樹形(樹冠形)の開発において、実際の樹を用いた試験には大きな困難を伴うことから、シミュレーション実験に取り組んだところ、一定の成果が得られたものと考えている。本研究成果中、特に、S-V比の序列(4表)および10a当り散布量の序列(第7表)と樹形構築選択枝の表(第2表)を照合することが肝心であり、実際の樹を用いた試験設計に役立つものと考えられる。さらに、最後のところで考察した相関関係は、今回用いた154樹形以外の新しい減農薬樹形の開発に役だつものと思われる。また、本研究の中で得られた幾つかの知見は今後の減農薬研究、たとえば、散布方法の改良、異なる樹種への拡張的応用の基礎になることを期待したい。

謝 辞

本研究の一部は平成19年度文部科学省科学研究費補助金(基盤研究C, No. 19580021)で実施した。記して謝意を表する。

摘 要

減農薬樹冠の検索と開発を目的に、果樹の樹形構築解析システム(CACOAS)に葉層表面積/葉層体積の値(以下、S-V比)の計算機能を追加した。また、CACOASからの出力の一つ、葉密度非ランダムデータを用いた薬滴付着量分布シミュレーションモデルを作成した。5つの樹形群と骨格枝配置の選択枝などを組み合わせて構築した合計154個のセイヨウナシ‘ラフランス’の樹形を対象に、20年間にわたり、上記2つのシミュレーションを実施した。S-V比シミュレーションの結果、S-V比には、細形主幹形>トレリス誘引>Y字形>開心形⇐変則主幹形の高低関係が現れた。よって、葉量を変えない条件下でも、細形主幹形やトレリス誘引仕立てのような樹冠形がスリムな樹形群はノズル方式の場合の減農薬にとって有利であると考えられた。SS方式における薬滴付着量シミュレーションの結果、樹冠外漂流量割合は非常に高く、少なく見積もっても約6割り以上であった。過剰付着を是正するために、シミュレーション結果を慣行付着量で基準化したところ、10a当たり散布量の20年間平均値には樹形によって大きな違いが現れ、その最大差異は約4割であった。基準化後の10a当たり散布量は樹高、樹冠下空間体積および葉密度との間に正の相関が認められ、反対に、東西樹幅、内部無効容積、葉層体積、樹冠体積および樹冠占有土地面積との間に負の相関が認められた。基準化前の付着量は、外部無効容積、葉層体積、樹冠体積および樹冠占有土地面積に対して正の相関が認められ、反対に、樹冠下空間体積と葉密度との間に負の相関が認められ、樹高との相関は認められなかった。上記の相関関係とともに、154樹形における2種類のシミュレーション結果の序列は減農薬樹形開発のための基礎的資料になるだろう。

引用文献

- Cross, J. V., P. J. Walklate, R. A. Murray and G. M. Richardson(2003) Spray deposits and losses in different sized apple trees from an axial fan orchard sprayer: Effects of spray liquid flow rate. *Crop Protection* 22: 381-394.
- Delele, M. A., A. D. Moor, B. Sonack, H. Raman, B. M. Nicolani and P. Verboven(2005) Modelling and validation of air flow generated by a cross flow air sprayer as affected by travel speed and fan speed. *Biosystems Engineering* 92: 165-174.
- Farooq, M. and M. Salyani(2004) Modeling of spray penetration and deposition on citrus tree canopies. *Trans. ASAE* 47: 619-627.
- Horie, T. and T. Udagawa(1971) Canopy photosynthesis of sunflower plants—Its measurements and modeling—. *Bull. Natl. Inst. Agric. Sci. Ser. A.* 18: 1-58.
- 黒岩澄雄(1990) UP BIOLOGY. 物質生産の生態学. 光合成から繁殖まで. 東京大学出版会. 東京.
- 宮島龍興(1990) 朝倉物理学講座. 力学 I. 朝倉書店. 東京.
- 農業機械学会(1977) 農業機械・施設試験方法便覧. 農業機械学会. 東京.
- Stover, E., D. Scotto, C. Wilson and M. Salyani(2003) Pesticide spraying in Indian river grapefruit: II. Overview of factors influencing spray efficiency and off-target deposition. *Horttechnology* 13: 166-177.
- Svensson, A. A., R. D. Brazee, R. D. Fox and L. A. Williams(2003) Air jet velocities in and beyond apple trees from a two-fan cross-flow sprayer. *Trans. ASAE* 46(3): 611-621.
- Tsay, T. R., L. S. Liang and L. H. Lu(2004) Evaluation of air-assisted boom spraying system under a no-canopy condition using CFD simulation. *Trans. ASAE* 47(6): 1887-1897.
- 山本隆儀(1999) 果樹園光環境解析システム(OLEAS). 山形大学紀要(農学) 13(3): 89-116.
- 山本隆儀・岩波乾太(2005) 2つのシミュレーションモデル(CACOASとOLEAS)によるリンゴ‘ふじ’の様々な樹形における樹高、作業空間、着果量および光環境の予測と比較. 農業環境工学関連7学会2005年合同大会講演要旨集: 299.
- Yamamoto, T. and K. Miyamoto(2004) Effects of reflective sheet mulching on net photosynthesis, leaf character and fruit quality of cherry and pear. *Environ. Control Biol.* 43(2): 71-82.
- Yamamoto, T., K. Miyamoto and Y. Satoh(2005) Rapid and simultaneous approximations of photosynthetic photon flux density and net photosynthetic rate in a cherry tree canopy by thermal imaging. *J. Japan. Soc.*

Hort. Sci. 74(2) 101-108.

山本隆儀・宮田裕美・野口マキ・奥山定治(2004)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. 山形大学紀要(農学)14(3) 59-93.

山本隆儀・野口マキ・松林美樹・菊池雄一郎・草村誠・今野拓道・谷澤佳美(2007)樹形構築解析システム(CACOAS)に用いる数種落葉果樹のパラメータの収集とその精度の検討. 山形大学紀要(農学)15

(2) 69-104.

山本隆儀・奥山神哉(2004)果樹の乱雑な葉層内における派生散乱光由来の光合成有効放射束密度とその簡易測定法. 農業気象. 60(4) 299-306.

山本隆儀・上田仁悦・小泉弘樹・西澤滝太(1990)落葉果樹の樹冠内放射の減衰係数とその推定パラメータ. 山形大学紀要(農学)11(13) 155-176.

安田与七郎編(1966)農業機械実施便覧. 養賢堂. 東京.