

## 数種落葉果樹の葉面傾斜角度分布に関する研究

山本隆儀・麻生桃代・西沢滝太・庄司紀幸・佐藤健吾・

小山智江・上野恵里・須田 慶

山形大学農学部生物生産学科農業生産学講座  
(平成20年9月18日受理)

### Studies on Distributions of Leaf Inclination Angle in Several Deciduous Fruit Trees

Takanori YAMAMOTO, Momoyo ASO, Takita NISHIZAWA, Noriyuki SYOJI,  
Kengo SATO, Satoe KOYAMA, Eri UENO and Kei SUDA

Section of Agricultural Production, Department of Bioproduction, Faculty of Agriculture,  
Yamagata University, Tsuruoka, 997-8555, Japan  
(Received September 18, 2008)

#### Summary

When a leaf was considered to be a flat plate, distributions of leaf inclination angle in the fruit tree canopies were approximated to a beta distribution. Many varieties of apple and pear, and a part of Japanese pear belonged to strongly horizontal type. A part of peach and cherry belonged to vertical type, and other varieties belonged to weak horizontal, intermediate and iso-angular types. There was no strong erect type. By monthly investigation of the distribution at an almost same portion in a tree crown, seasonal variation was not so distinguished. Methods for measurement of distribution of surface inclination angle on non-flat leaf were devised using the wire-frame diagrams, which were obtained by a stereo-photogrammetry. Rotation of the wire-frame diagram was effective using rotation angles which were obtained by simple measuring of inclination angle of both mid-rib line of each leaf and a perpendicular line to the mid-rib. In the many fruit varieties, the curvature increased in May and summertime (July and August), and decreased in June and September. In apple (especially, central leader) and persimmon, the horizontal type was found at the upper canopy layers, and the weak horizontal type and the intermediate one were found at the mid-layers and the lowers. In peach, change of the distribution by the height was little. Horizontal type became strong in the upper part of pear and Japanese pear with trellis training, where summer pruning was lacking. From these results, inclination angles of current shoots seemed to be a main factor for intra-crown fluctuation of leaf inclination angle.

**Key words** : distribution of leaf inclination angle, shoot angle, extinction coefficient of direct beam, non-flat leaves, deciduous fruit trees

#### 緒 言

植物群落内放射分布は投射光強度とともに葉量や枝量の空間分布に強く影響されるが、このほか葉の光学的性質や葉面傾斜角度などにも影響される。葉面傾斜角度分布は、葉が立つイネ科植物群落と水平葉の多いヒメアザミ群落を比較した Monsi・Saeki (1953) の植物群落生

産構造の研究に見るように、葉層の吸光係数に密接に関わる。一方、個々の葉の直達光受光強度は葉面傾斜角度によって大きく変化する (Yamamotoら, 2005)。このように、葉面傾斜角度分布は葉量の空間分布などとともに植物群落内放射分布の解析にとって不可欠な要因であり、これまで多くの植物を対象に、葉量、放射分布、光合成速度などの垂直分布とともに葉の傾斜角度分布の垂

キーワード：葉面傾斜角度分布、新梢角度、直達光吸光係数、湾曲葉、落葉果樹

直分布が測定されている（宇田川，1980）．最近の測定例としては6種の針葉樹（Barclay，2001），ヒノキ（Utsugiら，2006），常緑硬葉樹と乾燥地半落葉性灌木（Gratani・Bombelli，1999），インゲンマメ（Victorら，1999），トウモロコシ（Españaら，1999），亜寒帯ポプラ（Kucharikら，1998），コムギ（Shibayama，2004）などがある．しかし，果樹の調査は極めて限られている（山本ら，1990）．

本研究は果樹樹冠内放射分布研究の基礎的資料を得るために，数種落葉果樹の葉面傾斜角度分布の実態調査を行なったもので，以下の4部分からなる．第1の部分では，植被内放射分布における葉面傾斜角度分布の重要性を明らかにするため，葉面傾斜角度データを用いて植被内放射に関連する幾つかの数値の試算を行った．第2の部分では，葉面を一枚の平板と見なしときの葉面傾斜角度分布の特徴を明らかにするため，樹冠底部から頂部までを含む樹冠全体の葉面傾斜角度を調査し，その分布の特徴を記すとともにベータ分布への適合度を試験した．また，樹冠の同一部に限定して葉面傾斜角度分布を経時的に調査し，その季節的变化を記した．第3の部分では，葉面の湾曲の実態を明らかにするため，最初に立体写真測量法を用いた湾曲情報の入手方法を記し，次に，この湾曲情報を取り入れた葉面傾斜角度分布の計測方法を検討した．さらに，この計測方法に基づいて，湾曲葉面としての葉面傾斜角度分布を解析した．第4の部分では，葉面傾斜角度分布の樹冠内変動要因を明らかにするため，数種落葉果樹における樹冠内高さ別の葉面傾斜角度分布の特徴を記した．また，葉面傾斜角度分布の樹冠内変動に及ぼす新梢の傾きの影響を解析した．さらに，落葉後の樹体写真から読み取った新梢角度と第3の部分の解析方法を用いて，樹冠における葉面傾斜角度分布の垂直方向の変化を推定した．上記以外に，葉面傾斜角度分布に及ぼす風の影響についても調査したが紙面の関係から本稿では省略した．

なお，葉の傾斜角度を近似するための分布関数として，これまでに幾つかの関数が提案されているが，最近Wangら（2007）はこれらの近似関数を比較検討している．望むべきは本研究中これらの検討結果を反映した解析を行うべきであったが，本研究ではこれまで最も多用されているベータ分布に限定して葉面傾斜角度分布を解析したことを断っておきたい．

## 材料及び方法

### 1. 葉面傾斜角度データを用いた植被内放射関連数値の試算

#### 1) 傾斜角度分布をベータ分布に近似するための計算方法および直達光の吸光係数（Kd）の計算方法

傾斜角度分布をベータ分布に近似するための計算式および直達光吸光係数（Kd）の計算方法についてはこれまで植物生態学分野および農業気象学分野で確立された方法に準じた．本論文ではこれらの計算式を頻繁に使用したので，その要点を以下に記す．すなわち，Monsi・Saeki（1953）の植物群落光合成理論における重要なパラメータとして葉層の吸光係数（減衰係数ともいう）がある．これは積算葉面積指数の増大に伴う透入光量の減少を特徴付けるものである．このうち，直達光の吸光係数（Kd）は植物群落内葉層の葉面傾斜角度と密接である（黒岩，1990）．すなわち， $I_0$ を植被上部の直達光， $I'$ を累積LAIの葉層を透過する直達光としたとき，両者の割合は  $I'/I_0 = \exp(-Kd \times \text{累積LAI})$  の式で表現される．植物群落内葉層の葉面傾斜角度は一様でなく，植物に特徴的な分布を示す．Horie・Udagawa（1971）は，葉の傾斜角度分布をベータ分布で近似したときの直達光吸光係数（Kd）の計算方法を確立した．一般に，ベータ分布関数  $B(\lambda, \nu)$  は1式で表現される．

$$B(\lambda, \nu) = \int_0^{0.5\pi} \left(\frac{2\alpha}{\pi}\right)^{\lambda-1} \left(1 - \frac{2\alpha}{\pi}\right)^{\nu-1} d\alpha \quad (1)$$

ここで， $\lambda$  と  $\nu$  はベータ分布関数のパラメータであり，葉の平均傾斜角度を  $\alpha$ ，その分散を  $\sigma^2$  としたとき，それぞれ，2，3式であたえられる．

$$\lambda = \frac{\alpha}{\sigma^2} \left( \alpha - \frac{2}{\pi} \alpha^2 - \frac{2}{\pi} \sigma^2 \right) \quad (2)$$

$$\nu = \frac{\pi}{2} \frac{1}{\sigma^2} \left( \alpha - \frac{2}{\pi} \alpha^2 - \frac{2}{\pi} \sigma^2 \right) \left( 1 - \frac{2}{\pi} \alpha \right) \quad (3)$$

Horie・Udagawa（1971）はベータ分布関数  $B(\lambda, \nu)$  から葉面傾斜角度の確率密度分布関数  $\Psi(\alpha)$  を求め（4式），さらに， $\Psi(\alpha)$  を用いて直達光の投射角度（ $h_0$ ）別吸光係数  $Kd_{h_0}$  を計算した（5式）．

$$\Psi(\alpha) = \frac{1}{B(\lambda, \nu)} \left(\frac{2\alpha}{\pi}\right)^{\lambda-1} \left(1 - \frac{2\alpha}{\pi}\right)^{\nu-1} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} Kd h_0 &= \int_0^{\alpha^*} \Psi(\alpha) \cos \alpha d\alpha \\ &+ \int_{\alpha^*}^{0.5\pi} 2\Psi(\alpha) \frac{2}{\pi} (\cos \alpha + \sin^{-1} u \\ &+ \sin \alpha \cot h_0 (1-u^2)^{0.5}) d\alpha \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 $\alpha^*$ は $h_0$ 、 $u = \cot \alpha \tan h_0$ であった。なお、1式および5式の積分計算にはシンプソンの近似積分法を用いた。以下、葉面傾斜角度の確率密度分布を略して葉面傾斜角度分布と記す。

2) ベータ分布の違いが太陽高度別Kd曲線と直達光割合に及ぼす影響の試算

葉面傾斜角度分布の違いによって、吸光係数 (Kd) および直達光割合にどれだけの違いが発生するかについて試算した。葉の平均傾斜角度 ( $\alpha$ ) とその分散 ( $\sigma^2$ ) が大きく異なるようにして6種の葉面傾斜角度分布を設定した (第1表)。すなわち、分散が一定値 (300度<sup>2</sup>) で葉の平均傾斜角度を15度、30度、45度、60度および75度、および、葉の平均傾斜角度が45度で分散が600度<sup>2</sup>とした。このことにより、それぞれ、強い水平型 (I)、水平型 (II)、中間型 (III)、直立型 (IV)、強い直立型 (V) および均一型 (VI) の葉面傾斜角度分布を作成した。6種のタイプのベータ分布から太陽高度別Kd曲線を比較した (5式)。さらに、この結果におけるKdの違いおよび  $I/I_0 = \exp(-Kd \times \text{累積LAI})$  の式を用いて、同一の太陽高度と同一の累積LAIで、どれだけの直達光割合の違いが発生するかについて試算した。

3) 日向部葉面受光強度の計算方法

葉の姿勢 (傾きと方角) と葉面の直達光受光強度の関係は古くから知られ、直達光の水平面強度を $I_{h0}$ としたと

き、日向部葉面受光強度 ( $I_{df}$ ) は6式で計算される (坪井, 1974)。

$$I_{df} = I_{h0} | \cos \alpha + \sin \alpha \coth \cos(\beta - \phi_s) | \quad (6)$$

ここで、 $I_{h0}$ は太陽光線 (平行光線) の水平面強度、 $\alpha$ は葉面傾斜角度、 $\beta$ は葉面方位角度、 $h$ は太陽高度、 $\phi_s$ は太陽方位角度である。ただし、方位角度はいずれも南中から東回りに測った角度である。

2. 葉面を1枚の平板と見なすときの樹冠内葉面傾斜角度分布の調査方法

1) 樹冠内葉面傾斜角度分布に関する樹種別および品種別の特徴とベータ分布の適合度の調査

1983年に山形大学農学部付属農場 (現やまがたフィールド科学センター) に栽培された、いずれも6年生の落葉果樹、9樹種合計28品種を1樹ずつ用いた (第2表)。第2表の品種名 (英名) のうち、'Rall Janet', 'Jonathan' および 'Rockport Bigarreau' の和名は、それぞれ、'国光', '紅玉' および '高砂' である。なお、ブドウ、ニホンナシおよびセイヨウナシは棚仕立て、その他の樹種は立木仕立てで栽培されていたが、台木については既報 (山本ら, 1990) を参照されたい。7月上旬から8月上旬の間に、以下の方法で葉面傾斜角度分布を調査した。樹冠の中心部にポールを立て、樹冠頂部より一定間隔に高さを区切り、各高さにおける発育枝葉と短枝葉をできるだけ均等になるようにして合計約50枚の葉を選んだ。1葉の代表的な葉面上の垂線 (以下、法線) と天頂のなす角度を読み取り、葉面傾斜角度とした。実際の葉面の向きはまちまちである。そこで、仮に葉面上に水を流したときに重力に沿って最も水が流れやすい線を想像し、この想像上の線に、糸に錘を付けた分度器 (以下、錘糸付き分度器) の底辺を垂直に当て、錘糸付き分度器の90度線と糸との交差角度を読み取り、葉面傾斜角度とした (第1図)。こ

Table 1 The six types of distribution of leaf inclination angle (LIA) and the parameters for the beta distribution.

Distribution type of LIA	Mean of LIA (degree)	Variance of LIA (degree <sup>2</sup> )	Parameters $\lambda$ $\nu$		Abbreviation of type
Strongly horizontal	15	300	0.458	2.292	I
Horizontal	30	300	1.667	3.333	II
Intermediate	45	300	2.875	2.875	III
Vertical	60	300	3.333	1.667	IV
Strongly vertical	75	300	2.292	0.459	V
Isotype	45	600	1.188	1.188	VI

Table 2 Means and the variances of leaf inclination angle, parameters for the beta distributions ( $\lambda$  and  $\nu$ ) and results of the chi square tests in several deciduous fruit trees in August.

Fruit species	Cultivars	Tree forms	Mean (degree)	Variance (degree <sup>2</sup> )	$\lambda$	$\nu$	$\chi^2$ value	Chi square test
Apple	SD <sup>z</sup>	Dwarf•CL <sup>y</sup>	26.36	322.5	1.232	2.974	0.169	** <sup>x</sup>
	SD	Semi dwarf•CL	25.05	256.1	1.493	3.865	0.046	**
	SD	Open center	25.25	258.7	1.494	3.834	0.057	**
	Fuji	Dwarf•CL	26.21	332.4	1.175	2.859	0.064	**
	Fuji	Semi dwarf•CL	25.04	405.0	0.844	2.183	0.181	**
	Fuji	Open center	26.92	375.6	1.054	2.470	0.051	**
	Mutsu	Dwarf•CL	27.42	391.3	1.032	2.356	0.136	**
	Mutsu	Semi dwarf•CL	22.42	225.8	1.424	4.291	0.028	**
	Rall Janet	Open center	27.69	289.2	1.530	3.442	0.111	**
Red Spar	Open center	19.14	179.9	1.391	5.151	0.013	**	
	Jonathan	Open center	28.62	375.0	1.173	2.516	0.122	**
Persimmon	Hiratanenashi	MCL <sup>w</sup>	33.21	372.4	1.501	2.568	0.054	**
Chestnut	Tukuba	MCL	44.04	241.6	3.615	3.775	0.098	**
	Tanzawa	MCL	28.48	225.4	2.145	4.634	0.091	**
	Ibuki	MCL	34.37	366.4	1.612	2.611	0.137	**
Walnut	Shinrei	MCL	36.83	402.3	1.584	2.288	0.031	**
	Yorei	MCL	45.99	325.8	2.668	2.555	0.015	**
	Banshun	MCL	36.38	247.9	2.779	4.098	0.346	**
Peach	Okubo	Open center	42.43	565.1	1.214	1.363	0.224	**
	Koyohakuto	Open center	51.31	414.1	2.168	1.636	0.110	**
	Hakuho	Open center	52.87	420.9	2.157	1.516	0.056	**
Cherry	RB <sup>v</sup>	Open center	54.30	282.9	3.538	2.330	0.584	* <sup>u</sup>
	Satonishiki	Open center	46.14	437.6	1.861	1.771	0.104	**
	Napoleon	Open center	40.67	426.0	1.678	2.037	0.095	**
Japanese pear	Shinseiki	Trellis training	36.29	505.9	1.152	1.706	0.058	**
	Shinsui	Trellis training	46.39	619.7	1.169	1.101	0.002	**
	Chojuro	Trellis training	30.82	392.4	1.251	2.402	0.401	**
Pear	Bartlett	Trellis training	34.79	574.1	0.908	1.442	0.066	**
	La France	Trellis training	42.92	554.7	1.262	1.386	0.208	**
	GC <sup>t</sup>	Trellis training	45.59	455.6	1.747	1.704	0.228	**
Grape	Delaware	Trellis training	42.46	350.1	2.251	2.522	1.427	
	Stuben	Trellis training	41.86	252.5	3.251	3.741	0.278	**
	Neo Muscat	Trellis training	42.32	332.3	2.388	2.692	0.209	**

<sup>z</sup> Starking Delicious.<sup>y</sup> Central leader.<sup>x</sup> Significant at the 1% level.<sup>w</sup> Modified central leader.<sup>v</sup> Rockport Bigarreau.<sup>u</sup> Significant at the 5% level.<sup>t</sup> Grand Champion.

のほか、葉面方位角度についても調査したが、ここでは省略する。1樹全体としての葉面傾斜角度分布の特徴を明らかにするため、全ての高さの葉面傾斜角度データを

集計し、15度階級幅による葉面傾斜角度の階級別頻度分布表を作成し、葉面傾斜角度の平均値と分散値を算出した。最終的に2、3式を用いてベータ分布のパラメータを

算出し、葉面傾斜角度分布を近似推定した。ベータ分布の適合度を調査するため、階級別頻度分布表を用いて $\chi^2$ 検定を行った。

## 2) 同一葉層における葉面傾斜角度分布の季節的变化

葉面傾斜角度分布の季節的变化を明らかにするため、1988年に山形大学農学部附属農場（現やまがたフィールド科学センター）に栽培された、いずれも11年生の落葉果樹の7樹種合計31品種および農学部実験果樹園に栽培された39年生カキ1品種と12年生のオウトウ3品種を1樹ずつ用いた。各品種の展葉開始時から落葉期まで、月1回の間隔で、各樹冠における調査者の手が届く樹冠高に限定したほぼ同一葉層を対象に、1品種約250枚の葉を無作為に選び、2. 1)に記した方法で葉面傾斜角度を測定し、引き続きベータ分布のパラメータを算出し、葉面傾斜角度分布を近似推定した。さらに、太陽高度別Kd曲線を作成した。

## 3. 葉面湾曲の季節的变化および湾曲が葉面傾斜角度分布に及ぼす影響

### 1) 湾曲葉の葉面傾斜角度分布の計測方法

2. までの実験は葉面を平板と見なしたときの葉面傾斜角度分布の調査であったが、程度の差こそあれ、葉面は湾曲しており、この湾曲を考慮した葉面傾斜角度分布を調査する必要がある。しかし、湾曲葉面の傾斜角度を

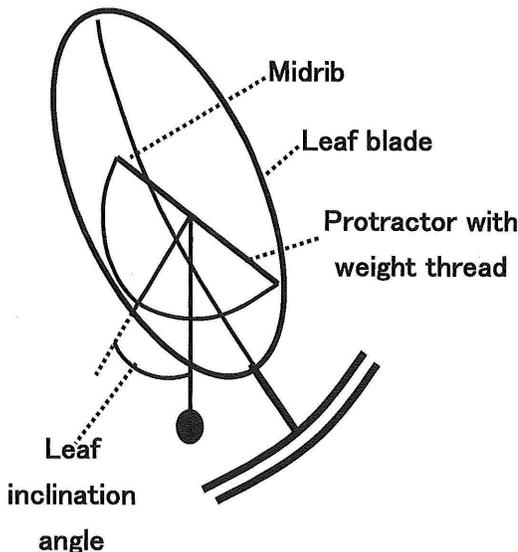


Fig.1 Measurement of leaf inclination angle using a protractor with weight thread.

実測することが著しく困難なため、これまでに調査されていない。そこで、立体写真測量法を用いた湾曲情報の入手方法およびこの湾曲情報を用いた樹冠内葉面傾斜角度分布の調査法として、2種類の計測方法を考案した。

### a) 立体写真測量法を用いた葉の湾曲情報の入手

典型的な湾曲葉を対象に葉柄を左にして水平に置き、基準点セットとともに左右写真を撮影し（第2図上）、立体写真測量を行うことで湾曲情報を入手した。立体写真測量用ソフトウェア（アジア航測株式会社、「計測名人」）を用い、標定解析を行なった後、偏位修正画像を作成し、ポイント・ストリング計測により葉面の合計98点の三次元座標を計測し（第2図中）、データを保存した。このデータを自作プログラムに入力し、隣接する点をつなぐことで葉面を169個の三角形に分けたワイヤーフレーム図を作成した（第2図下）。以下、水平に置いた葉のワイヤーフレーム図を原ワイヤーフレーム図と記す。上記データは別の自作プログラムにより葉面上各三角形の傾斜角度計算および湾曲程度の調査に用いた。さらに、上記データとワイヤーフレーム図は以下に示す果樹園での湾曲葉面傾斜角度分布のリモート計測に使用した。なお、湾曲程度を判定するとき、水平に置いたときの葉面上三角形区分の傾斜角度平均値が0に近く、その分散値がより小さいほど、湾曲程度が小さいと見なした。

### b) ワイヤーフレーム回転図形の画像解析結果と葉群写真の画像解析結果を用いた湾曲葉の葉面傾斜角度分布のリモート計測方法：画像計算値当てはめ法

供試品種には山形大学農学部実験果樹園内に栽植されたリングの'ふじ'（22年生M26台）と'紅玉'（56年生マルバカイドウ台）、セイヨウナジラ・フランス'（24年生ヤマナシ台）、オウトウ'佐藤錦'（14年生アオバザクラ台）およびカキの'平核無'（56年生カキ共台）と'次郎'（56年生カキ共台）を用いた。夏季にa)に記した原ワイヤーフレーム図を品種あたり5個ほど入手したのち、5組の98点空間座標を平均することで平均的な原ワイヤーフレーム図を作成した。この平均的な原ワイヤーフレーム図を自作プログラムによりx軸、y軸、z軸それぞれ10度刻みの回転角度（ $\zeta$ 、 $\theta$ および $\phi$ ）を組み合わせて、合計46,656通りの回転処理を行い、回転角度の組み合わせ表と回転後のワイヤーフレーム図を保存した（第3図）。なお、回転処理のための回転マトリクスと回転式は山本（1983）に準じた。ワイヤーフレーム図自体は2値化画像なので、回転後のワイヤーフレーム図を対象に、画像解

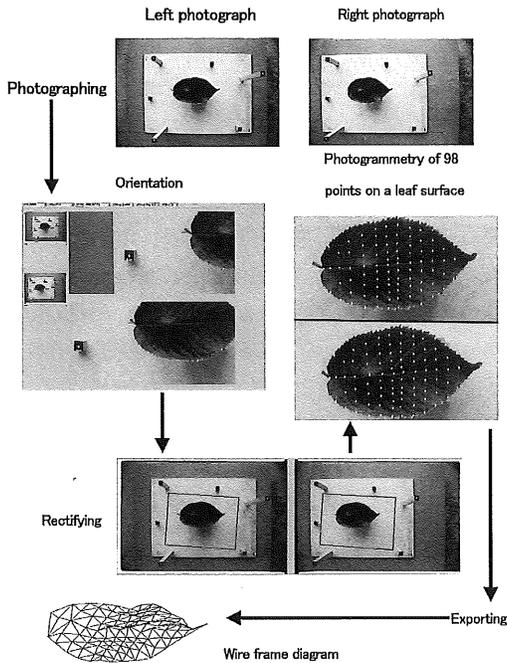


Fig.2 The step in the measurement of non-flat leaves by the stereo-photogrammetry.

析ソフト（デジモ, Image Hyper II）を用いて物体の形状に関する12項目（円形度係数, 形状係数1, 形状係数2, 形状係数3, 形状係数4, 周囲長面積比, 楕円角度, 楕円短軸長軸比, フェレ径角度, フェレ径面積率, 最大径角度, および短径長径比）の画像計算を行った（第3図）。なお, この膨大な数の画像計算を手動で行うことは困難なため, Image Hyper IIの自動計算機能を用いた。次に, 果樹園における対象葉群を白色系のバックを用いて撮影し, 種々の画像処理を経てから, 最終的に対象葉群の2値化画像を作成し（第4図）, 上記と同じ12項目の画像計算を行った。自作プログラムは対象葉の12項目画像計算結果と46,656個のワイヤーフレーム図の各12項目画像計算結果とを照合し, 形状に関する数値が最も近いワイヤーフレーム図を検出した（第3図）。検出された3軸回転角度（ $\xi^*$ ,  $\theta^*$ および $\phi^*$ ）を用いて, 再度, 原ワイヤーフレーム図を回転するとともに, 169個の三角形の傾斜角度を計算し, 保存した。最終的に169個の三角形傾斜角度の平均値と分散値を計算した。また, 湾曲葉中心部（平坦部）に限定した合計20個の三角形の傾斜角度平均値とその分散値も計算した。以下, このリモート計測法を「画像計算値当てはめ法」と記す。

次に, この方法の有効性を検証するため, 2003年に室内で対象品種の新梢約10本を水切り採取し, 白色系バックとともに水平撮影し, 着生葉の葉面傾斜角度を2. 1)で記した方法で実測してから, 画像計算値当てはめ法を用いて対象葉の平坦部葉面傾斜角度をリモート計測し, 実測値とリモート計測値を比較した。

### c) 葉姿勢の簡易計測と湾曲葉ワイヤーフレームの回転を組み合わせた葉面傾斜角度分布の計測方法：ワイヤーフレーム回転法

上記b)の方法とは別に, 果樹園で個々の葉の姿勢に関する比較的簡単な調査を行い, この調査結果を用いて原ワイヤーフレームを回転することで湾曲葉の葉面傾斜角度分布を計測する方法を考案した。新梢上に着生した葉の1枚1枚について, 葉の上面が天空を向くか地面を向くか, さらに葉先が天空を向くか地面を向くかを記録したうえで, 中肋線に錘糸付き分度器を当てて中肋線の傾斜角度を測定した（第5図上）。次に, 同じ葉の葉柄側から葉先方向を見たとき葉面が右上がりか左上がりかを記録したうえで, 中肋線に対する垂線に錘糸付き分度器を当てて, その傾斜角度を測定した（第5図上）。中肋線および中肋線に対する垂線は容易に判断できるので, 同じ錘糸付き分度器を用いたとはいえ, 2. 1)に記した葉面傾斜角度の測定よりはるかに容易であった。上記の葉姿勢の調査結果をもとに, 以下の方法で原ワイヤーフレームの回転角度を求めた。すなわち, 葉の上面の向き, 葉先の向きおよび葉面が右上がりか左上がりかの区別と2種類の傾斜角度から, 0~360度の範囲内でx軸に対する回転角度（ $\xi$ ）およびy軸に対する回転角度（ $\theta$ ）を計算した（第5図中）。立体写真の平面がx-y平面であるので, x軸を中心にxが大なる方向を見ながら $\xi$ だけ回転し, 次に, y軸を中心にyが大なる方向を見ながら $\theta$ だけを反時計針方向に回転した（第5図下）。なお, z軸回転角度は葉面方位角度に関連するが, 葉面傾斜角度には無関係である。次に, ワイヤーフレーム図の回転後データを用いて, 3. 1) b)と同様に, 169個の三角形の傾斜角度を計算し, 保存した。また, 湾曲葉の平坦部に限定した部分の傾斜角度を平均し, 平坦部平均傾斜角度とした。以下, この計測法を「ワイヤーフレーム回転法」と記す。

### 2) 湾曲程度の季節的变化の調査

上記c)の実験に用いたワイヤーフレーム図を入手するに当たって, 湾曲の程度が季節によって変化することが予想されたので, 2005年6月から10月の間の5期に分けて,

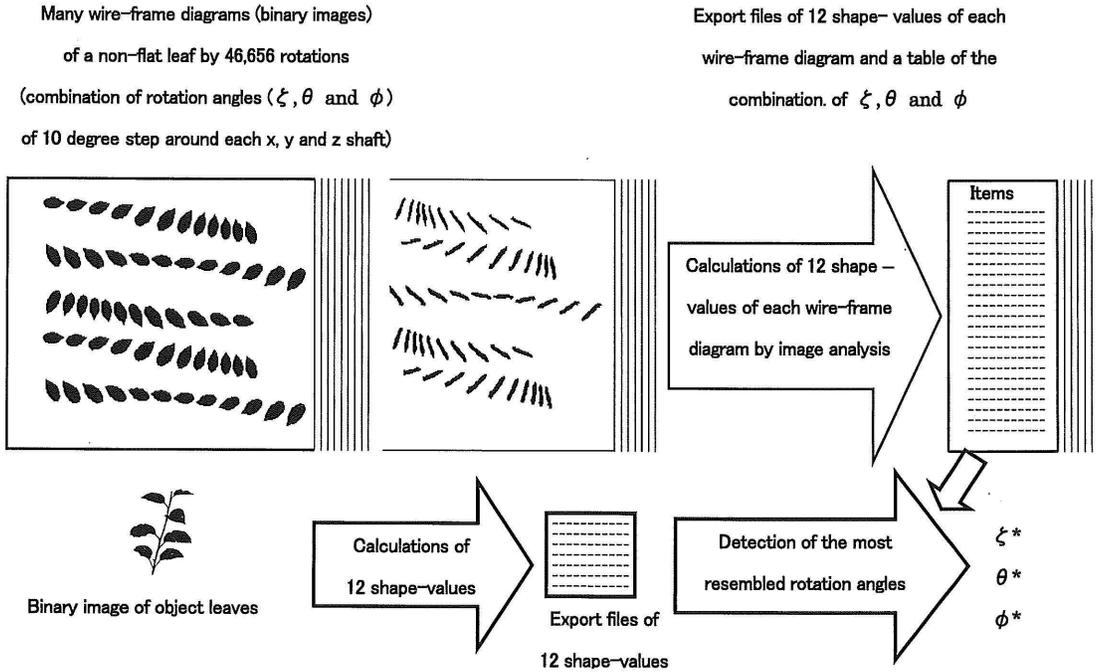


Fig.3 A method to detect leaf rotation angles using several shape-values of leaf by image analysis.

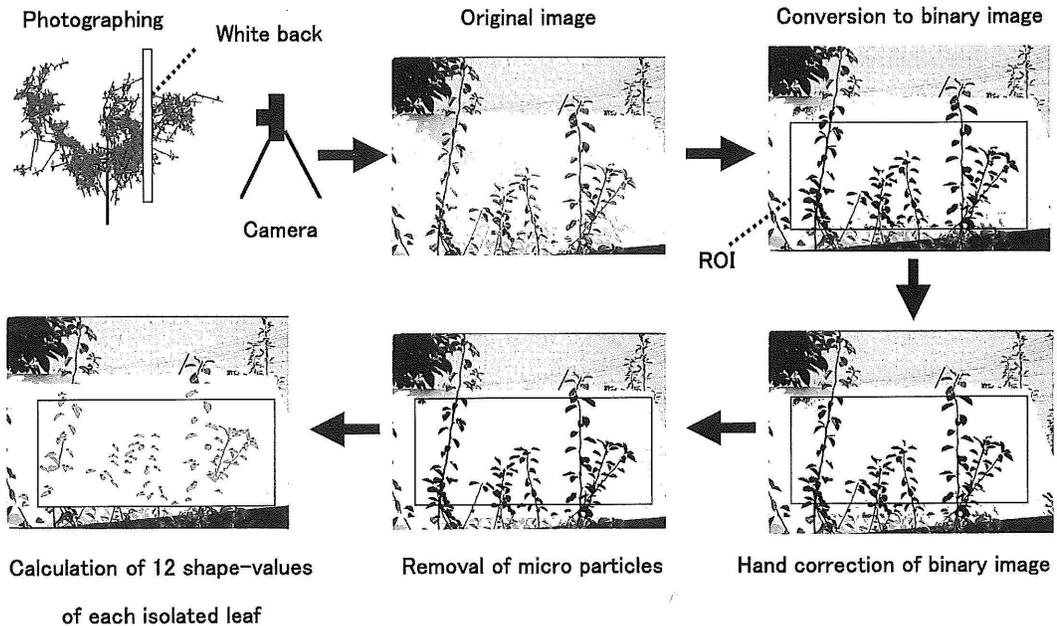


Fig.4 Photographing of leaves in field and several steps in the image processing and analysis. ROI indicates range of interest.

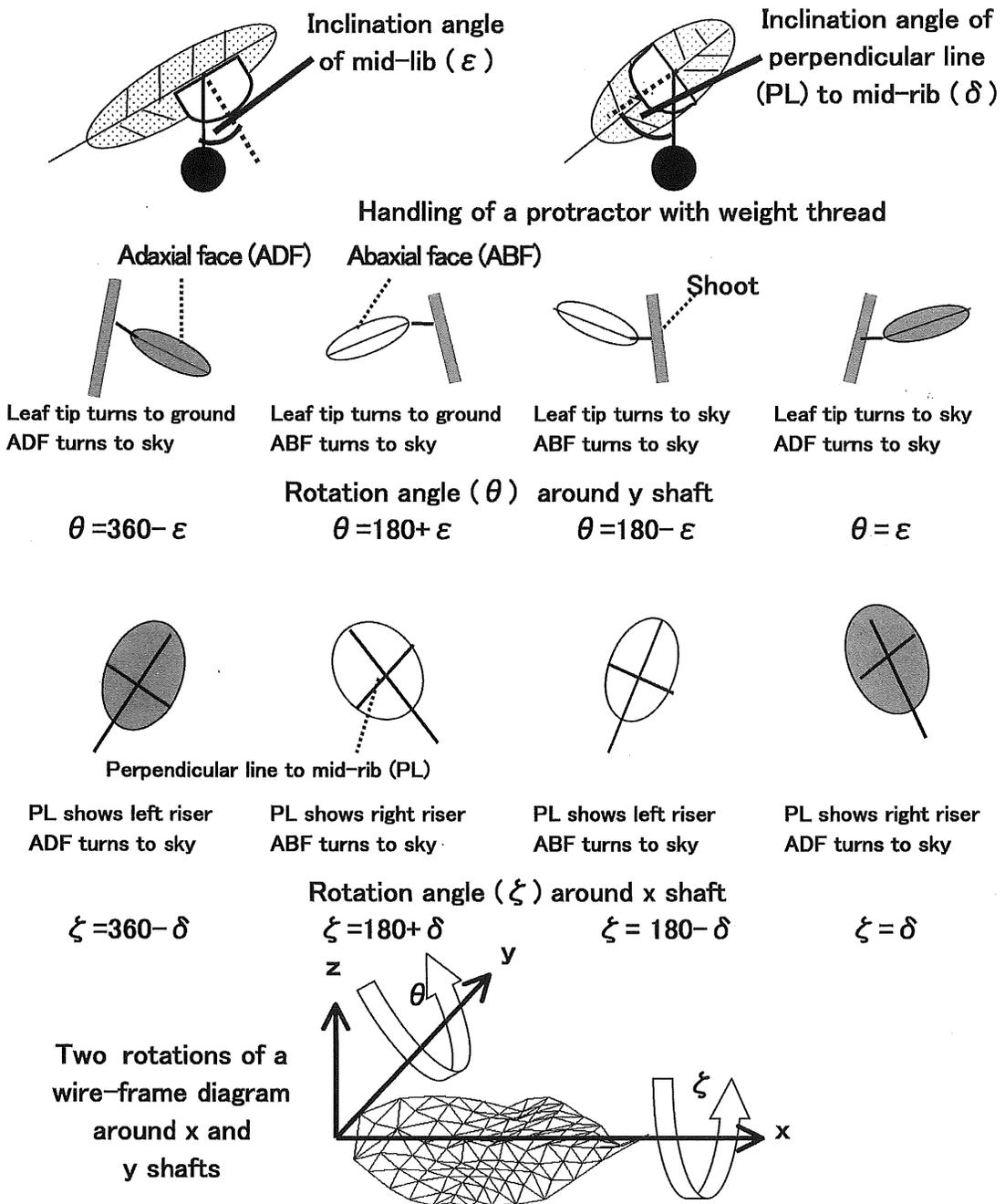


Fig.5 The schema of easy measurement of leaf attitude to detect rotation angles around x and y shafts in the wire-frame rotation method.

1品種1期につき8枚の典型的な湾曲葉の左右写真を撮影し、立体写真測量を行った。供試材料として山形大学農学部実験果樹園栽植のオウトウの'佐藤錦' (16年生アオバザクラ台) と'ナポレオン' (16年生アオバザクラ台)、セイヨウナシの'ラ・フランス' (25年生ヤマナシ台) と'ル・レクチュ' (16年生ヤマナシ台)、リンゴの'紅玉' (58年生マルバカイドウ台) と'ふじ' (24年生M26台) およびカキ'平核無' (58年生カキ共台) を用いた (いずれも2005年当時)。

#### 4. 葉面傾斜角度分布の樹冠内変動

##### 1) 樹冠内高さ別の葉面傾斜角度分布の調査

2. 1) に記した実験結果 (7月上旬~8月上旬) を用いて、樹冠内高さ別に集計し、樹冠内高さ別の葉面傾斜角度分布を調査した。また、高さ別の葉面傾斜角度分布から、樹冠内高さ別の直達光吸収係数(Kd)を計算し、比較した。

##### 2) 新梢の傾きと葉面傾斜角度分布の関連性の調査

供試材料には山形大学農学部実験果樹園栽植のオウトウの'佐藤錦' (16年生アオバザクラ台) と'ナポレオン' (16年生アオバザクラ台)、セイヨウナシの'ラ・フランス' (25年生ヤマナシ台) と'ル・レクチュ' (16年生ヤマナシ台)、リンゴの'紅玉' (58年生マルバカイドウ台) と'ふじ' (24年生M26台) およびカキ'平核無' (58年生カキ共台) を用いた (いずれも2005年当時)。5期にわたり新梢の傾きが異なった18本の新梢を選び、錘糸付き分度器の底辺を新梢に当て、錘の付いた糸と分度器の90度線とのなす角を読み取った (第6図)。新梢の傾きは枝先が天空を向くときは+、地面を向くときは-を付けて+90度から-90度の範囲の角度として記録した。以下、新梢の傾きを新梢角度と記す。さらに、その新梢上に着生したすべての葉について、3. 1) のc) に記した方法で、着生葉の姿勢に関する調査を行い、この調査結果とワイヤーフレーム回転法により、各期の湾曲葉の葉面傾斜角度を計測した。各期5枚から8枚の葉の原ワイヤーフレーム図を準備した上で、自作プログラムにより、新梢着生葉ごと乱数を発生して原ワイヤーフレーム図を選んで用いるようにした。

新梢角度とその上の着生葉の葉面傾斜角度分布との関係を明らかにするため、毎月、新梢ごと、全三角形区分および平坦部の傾斜角度の平均値と分散値を計算した。この結果から、新梢角度などによる葉面傾斜角度の平均

値と分散値の重回帰分析を行った。すなわち、新梢角度の6乗までのべき値を説明変数とした葉面傾斜角度の平均値の重回帰分析を行なった。さらに、新梢角度の3乗までのべき値、葉面傾斜角度の平均値の3乗までのべき値および交互作用項 (新梢角度×葉面傾斜角度の平均値) を説明変数とした葉面傾斜角度の分散値の重回帰分析を行なった。なお、重回帰分析にはSAS Ver 9.2のSTEPWISE法を用いた。さらに、得られた重回帰推定式と自作のプログラムにより、新梢角度の全範囲における葉面傾斜角度分布 (ベータ分布図) を推定した。

##### 3) 樹冠内高さ別の新梢角度を用いた葉面傾斜角度分布の解析

供試材料として、山形大学農学部実験果樹園栽植のオウトウ'ナポレオン' (18年生アオバザクラ台)、リンゴ'紅玉' (60年生マルバカイドウ台)、セイヨウナシの'ラ・フランス' (27年生ヤマナシ台) と'ル・レクチュ' (18年生ヤマナシ台) およびカキ'平核無' (60年生カキ共台) に加え、やまがたフィールド科学センター果樹園栽植の主幹形'ふじ' (30年生M26台) および開心形'ふじ' (30年生マルバカイドウ台) を用いた。2007年1月の冬季 (落葉後) に各高さから樹冠を真横撮影し、その写真画像を画像解析システム (デジモ, Image Hyper2) を用いて取り込んだ。パソコン画面上で、カメラレンズ面にはほぼ平行に写っているものと判断できた新梢に限定して、分度器を当てて新梢角度を読み取り、-90度から+90度までを3度刻みで60の階級に分け、各階級の発育枝と短枝の本数を読み取った。このとき、短枝には6葉、発育枝には18葉が着生するとみなして各階級の着生葉数を計算した。次に、全三角形区分および平坦部の葉面傾斜角度平均とその分散の各重回帰推定式を用いて、高さ別の葉面傾斜角度分布を推定した。なお、高さ別の集計に当たり、以下の計算式を用いた。すなわち、各群 ( $i=1, 2, \dots$ ) の葉の傾斜角度に関する平均値 ( $X_1, X_2, \dots$ )、分散 ( $V_1, V_2, \dots$ )、葉数 ( $N_1, N_2, \dots$ ) が与えられているとき、各群の葉面傾斜角度の偏差平方和は  $S_i = V_i N_i$  の式で計算できる。また、数群和の分散の公式 (石川, 1964) より、これらの合同群の葉面傾斜角度の平均  $\bar{X}$ 、偏差平方和  $S$  および分散  $V$  は、それぞれ、次式で計算できる。

$$X = \sum N_i X_i / \sum N_i \quad (7)$$

$$S = \sum S_i + \sum N_i (X_i - X)^2 \quad (8)$$

$$V = S / \sum N_i \quad (9)$$

ここで、各群とは新梢角度の各階級データ、 $i=1, 2, \dots$  は一

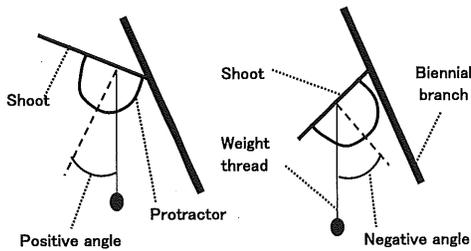


Fig.6 Measuring of shoot angle using a protractor with weight thread.

90度から90度までの階級化番号，および，合同群の葉とは各高さの葉群を意味する。

## 結 果

### 1. 植被内放射分布における葉面傾斜角度分布の重要性

#### 1) 異なるベータ分布に対応した太陽高度別Kd曲線の違いとその意義

6種類のベータ分布（第7図左）の太陽高度別Kd曲線を比較したとき同一の太陽高度におけるKd値には一見大きな違いは見られない（第7図右）。しかし，直達光の減衰割合の計算式である $I/I_0 = \exp(-Kd \cdot LAI)$ の式に，LAIの一定値と太陽高度別Kd値を代入して，直達光の減衰割合の違いを比較したとき， $I/I_0$ 値はKdとLAIの積のべき乗式で表現されるため，無視できない大きな違いが算出され（第8図），葉面傾斜角度分布の違いが直達光割合を大きく左右することが認められた。

#### 2) 葉面傾斜角度の違いが葉面直達光強度に及ぼす影響

葉面傾斜角度は葉面直達光強度と密接である（6式）。周知のように，太陽光線が葉面に垂直に当たるほど葉面直達光強度が大きい（第9図）。時刻（太陽方位）とも関係するが，日本では太陽高度はさほど高くないため，葉面がある程度傾いた方が葉面直達光強度が大きくなる場合が多い（第9図）。

### 2. 葉面を1枚の平板と見なしたときの葉面傾斜角度分布

#### 1) 数種落葉果樹の樹冠内葉面傾斜角度分布の特徴とベータ分布の適合度

各果樹の葉面傾斜角度分布（平均値と分散値），ベータ分布のパラメータ（ $\lambda$ と $\nu$ ）および15度階級幅で測定した階級別頻度分布表によるベータ分布の $\chi^2$ 検定結果

を第2表に記した。ベータ分布に適合すると判断して誤まる確率はブドウ'デラウェア'とオウトウ'高砂'を除く他の31品種では1%以下であった。従って，果樹の葉面傾斜角度分布はベータ分布に良く近似できたものと判断される。

調査に用いた28品種について，ベータ分布に近似したときの葉面傾斜角度分布を第10，11図に示した。葉面傾斜角度分布形を簡潔に形容するため，6タイプ（強い水平型，弱い水平型，中間型，均一型，弱い直立型および強い直立型）を参考にしたとき（第7図左），28品種の葉面傾斜角度分布は以下のように分類された。強い水平型には'国光'を除くリンゴ全品種，ニホンナシの'長十郎'およびセイヨウナシの'バートレット'が含まれた。弱い水平型には'国光'，ニホンナシの'新世紀'，カキ'平核無'，クリの'丹沢'と'伊吹'，クルミの'信鈴'と'晩春'およびオウトウ'ナポレオン'が含まれた。中間型にはクリ'筑波'，クルミ'要鈴'，オウトウ'佐藤錦'，セイヨウナシ'グランド・チャンピオン'およびブドウの3品種が含まれた。直立型にはオウトウ'高砂'，モモの'高陽白桃'および'白鳳'が含まれた。均一型にはモモ'大久保'，ニホンナシ'新水'およびセイヨウナシ'ラ・フランス'が含まれた。強い直立型に該当する品種は無かった。ただし，この結果は8月に限定されていたことをこたわっておく。

#### 2) 葉面傾斜角度分布の季節的变化と直達光の吸光係数

全供試品種の樹冠内同一部における葉面傾斜角度の経時的計測結果を用いて，ベータ分布と太陽高度別Kd値を計算し，これらの季節的变化を比較した（第12図）。なお，このうち葉面傾斜角度分布の平均値， $\lambda$ および $\nu$ の数値についてはOLEAS関連パラメータに関する研究論文に記載したので（山本ら，1990），本報では，各樹種1品種に限定したうえで，既報には掲載しなかったベータ分布形や太陽高度別Kd曲線のみを示し，季節的变化の特徴を記した。個々の樹の季節的变化には例外的要素や誤差的要素が見られたが，樹種別に比較したところ，以下のような傾向が見られた。すなわち，リンゴでは，5月と夏季（7月と8月）に葉面傾斜角度は大きくなったが，総じて季節的变化は小さかった（第12図）。クルミでは総じて夏季に向かって葉面傾斜角度は大きくなり，9月以降小さくなり，モモでは6月頃に葉面傾斜角度は大きくなり，オウトウでは8月頃に葉面傾斜角度は大きくなった（第12図）。ニホンナシでは6月頃に葉面傾斜角度は大きくなった（第12図）。セイヨウナシ'ラ・フラン

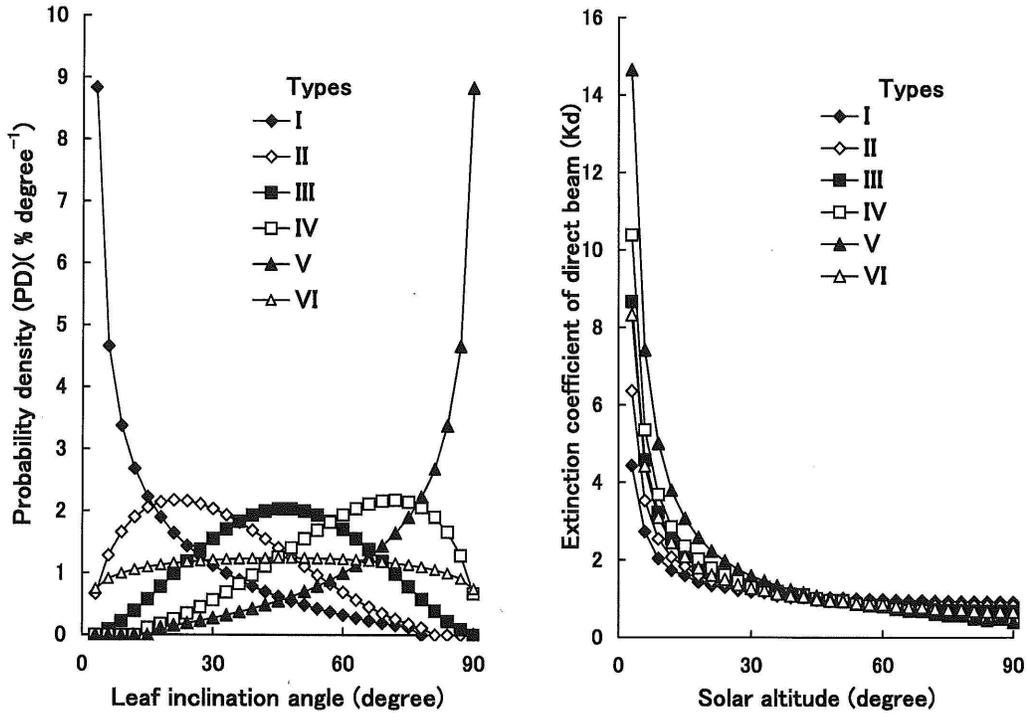


Fig.7 Probability densities of leaf inclination angle and extinction coefficients of direct beam in the six types of beta distributions shown in Table 1.

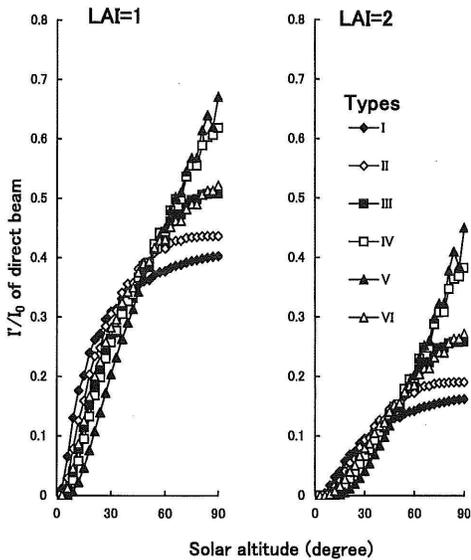


Fig.8 Relative intensity of direct beam ( $I/I_0$ ) of several solar altitude at LAI=1 (left) and LAI=2 (right) in the six types of beta distribution of leaf inclination angle.

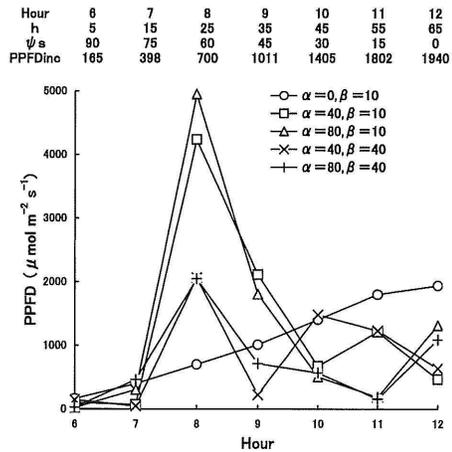


Fig.9 Five examples of photosynthetic photon flux density (PPFD) on sunlit leaf surface of direct beam, which are affected by combinations of solar altitude (h), solar direction angle ( $\psi_s$ ), incident PPFD on horizontal plane (PPFDinc), leaf inclination angle ( $\alpha$ ) and leaf direction angle ( $\beta$ ), where  $\beta$  and  $\psi_s$  were measured from south to east.

ズ'の葉面傾斜角度分布の季節的変化は僅かであったが、残り2品種の葉面傾斜角度は5月に小さく、6月にかなり大きくなった（第12図）。ブドウは9樹種の中で葉面傾斜角度の季節的変化が最も大きく現れた（第12図）。3品種とも葉面傾斜角度は5月から6月にかけて小さくなり、7、8月と徐々に大きくなったが、9月に再び小さくなった（第12図）。上記の葉面傾斜角度分布の季節的変化に対応した太陽高度別Kd値の季節的変化が現れたが（第12図）、総じてその変化は小さかった。

### 3. 葉面の湾曲の特徴と湾曲葉面の傾斜角度分布

#### 1) 湾曲葉面の傾斜角度分布計測方法の検討結果

6品種（室内実験）の画像計算値当てはめ法によるリモート計測値と錘糸付き分度器による葉面傾斜角度の実測値を比較し、その一部を第13図に示した（他の品種については省略）。なお、三角形区分ごとの傾斜角度の実測は不可能のため、葉単位として行った。葉面傾斜角度の実測値に対してリモート計測による平坦部葉面傾斜角度の平均値はほぼ1:1線付近に分布する傾向がみられたが、1:1線から乖離するものも多かった（第13図右）。全三角形区分の平均値についても同様な傾向が見られた

（第13図左）。

#### 2) 湾曲程度の季節的変化

1例として'ナポレオン'の各月のワイヤーフレーム図を第14図に示した。また、供試全品種の湾曲葉面傾斜角度の平均値と分散値の季節的変化を第3表に示した。この場合の平均値とはすべての三角形区分の傾斜角度を平均した値であり、葉を水平面に置いたときに平均してどのくらい傾いているかを示す。一方、分散値とは三角形区分の傾斜角度にどれだけのばらつきがあるかを示す。両者の数値が大きいほど葉の湾曲程度が大きいことを意味する。

'ナポレオン'では展葉間もない5月と高温・乾燥による水ストレスが発達する7、8月で、湾曲程度が大きくなった（第3表）。一方、梅雨時の6月と夏季の水ストレスが軽減し、葉生長が衰退した9月には湾曲程度が再び小さくなった。'佐藤錦'、'紅玉'および'ラ・フランス'でもほぼ同様の傾向が見られた。晩生品種の'ふじ'では6、7月に湾曲程度が小さかった。'ル・レクチュ'は7月に湾曲程度が最も大きかった。'平核無'は6、7月に湾曲程度が減少したが、他の品種に比べて全体的に湾曲程度が大きかった。

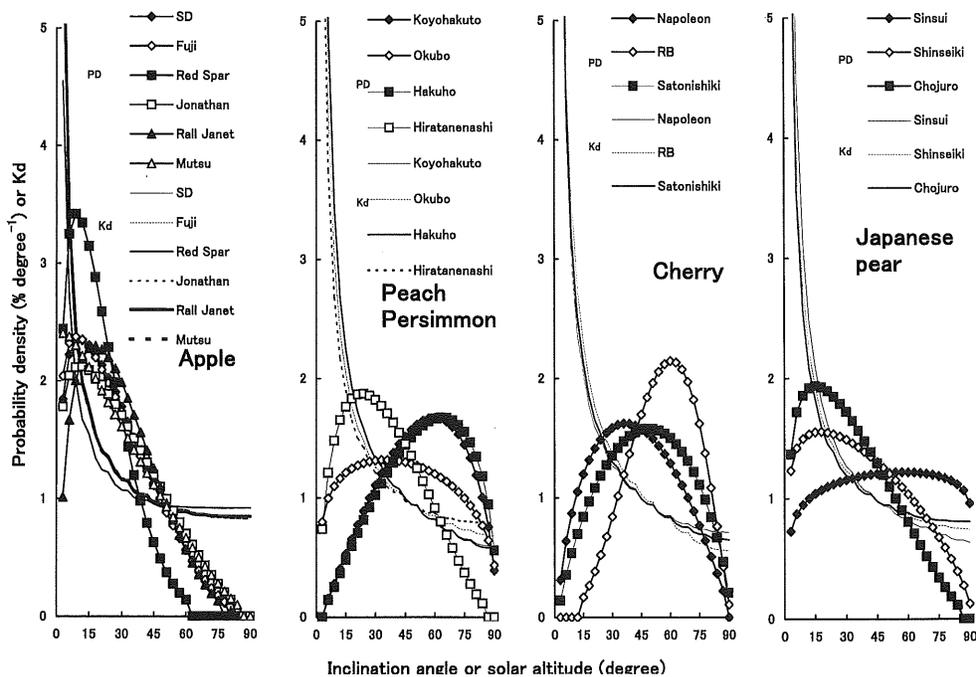


Fig.10 Probability densities of leaf inclination angle and extinction coefficients of direct beam in apple, peach, persimmon, cherry and Japanese pear. RB indicates 'Rockport Bigarreau'.

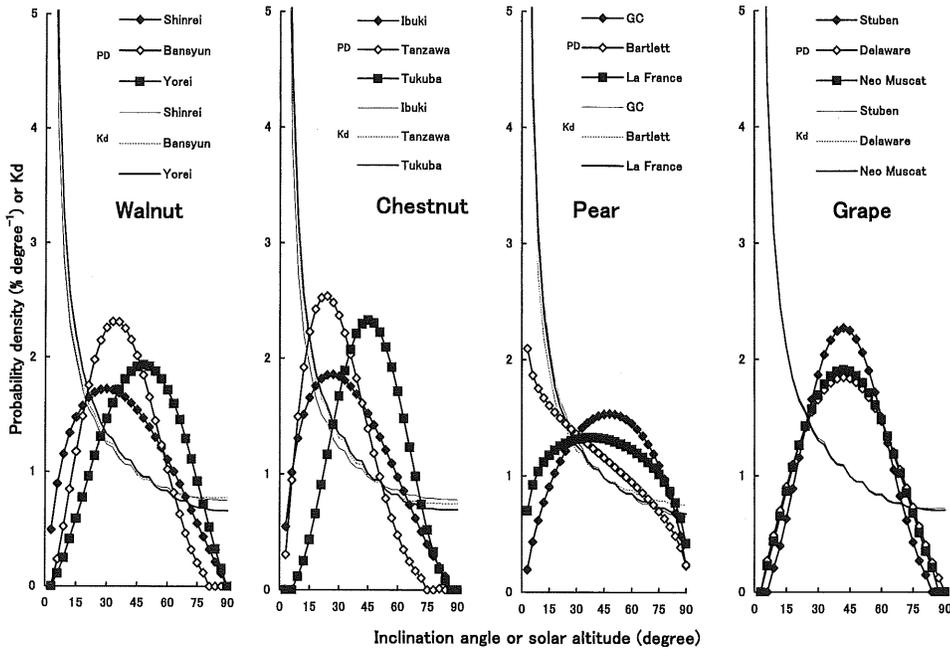


Fig.11 Probability densities of leaf inclination angle and extinction coefficients of direct beam in walnut, chestnut, pear, and grape.

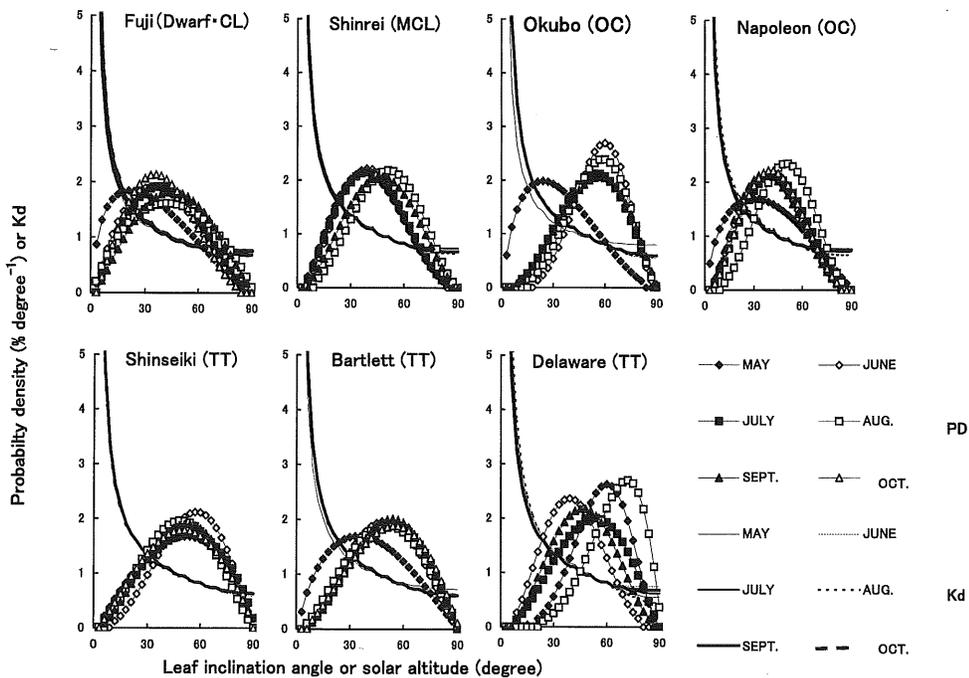


Fig.12 Seasonal changes of probability densities of leaf inclination angle and extinction coefficients of direct beam in several deciduous fruit trees. Abbreviations of tree shape refer to Table 2.

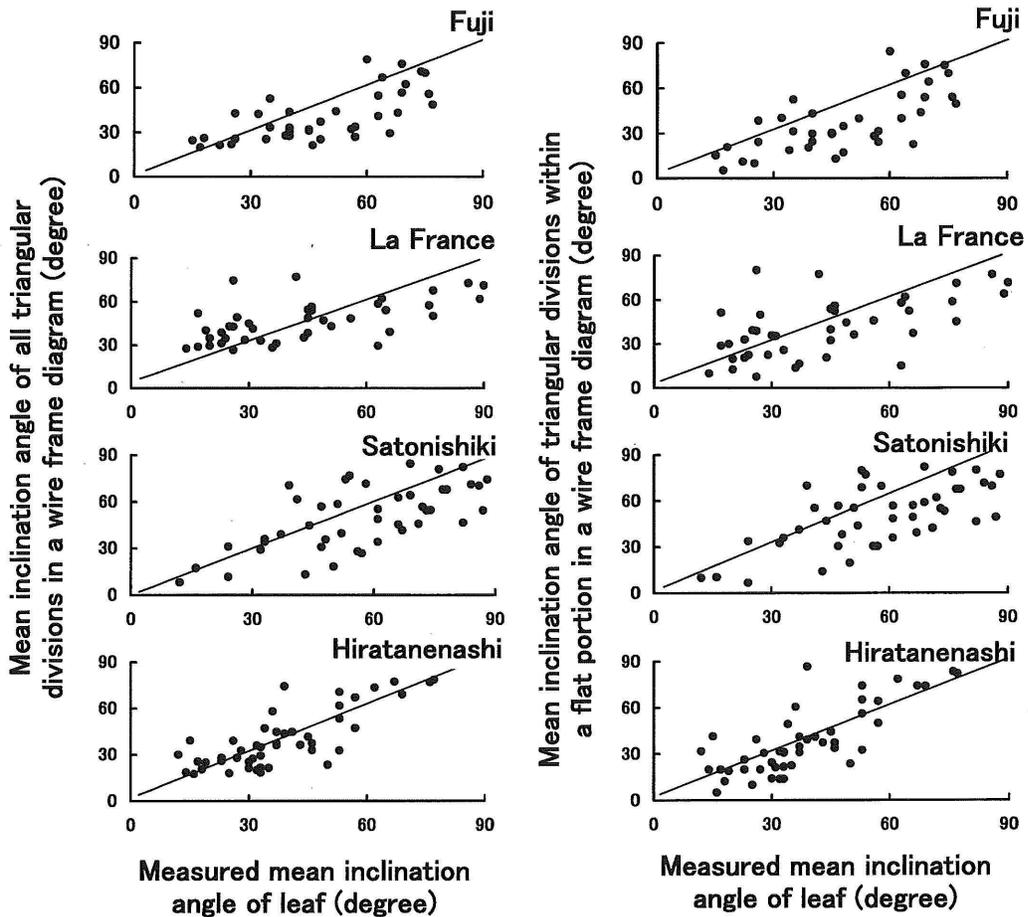


Fig.13 Relations between the measured leaf inclination angles and estimated ones by the comparative method of leaf-shape values of leaf wire-frames in several deciduous fruit trees. The lines indicate 1:1 lines.

#### 4. 葉面傾斜角度分布の樹冠内変動

##### 1) 数種落葉果樹の樹冠内高さ別の葉面傾斜角度分布

7月上旬から8月上旬の間における供試品種の樹冠内各高さの葉面傾斜角度分布とそのベータ分布のパラメータを第4表に記した。なお、棚仕立てのセイヨウナシの2品種およびブドウの3品種については葉層が薄く、高さ別の調査は行なわなかった。また、これらのベータ分布および太陽高度別Kd曲線を第15～18図に示した。リングでは樹冠上層ほど水平型になり、中間層や下層では弱い水平型や中間型が多かった（第15図および第4表）。この場合、わい性および半わい性の主幹形でこの傾向が強く、開心形ではこの傾向が弱かった。リング主幹形ほどではなかったが、カキでは上層ほど水平型になり、樹冠中間

層や下層では中間型であった（第16図および第4表）。クルミは樹冠上層においても中間型が多く、一方、中間層でも弱い水平型が見られた（第16図および第4表）。クリでは樹冠上層で弱い水平型になり、下層で中間型ないし弱い直立型が認められた（第17図および第4表）。モモでは樹冠高さによる分布形の変化が目立たなく、均一型、中間型および直立型が見られた（第17図および第4表）。アウトウでは高さによって分布型が大きく異なったが（第18図および第4表）、その傾向は判然としない。夏季剪定を行わず、上層において発育枝が残存したセイヨウナシ'バートレット'とニホンナシ'長十郎'では強い水平型が見られた（第16、17図および第4表）。

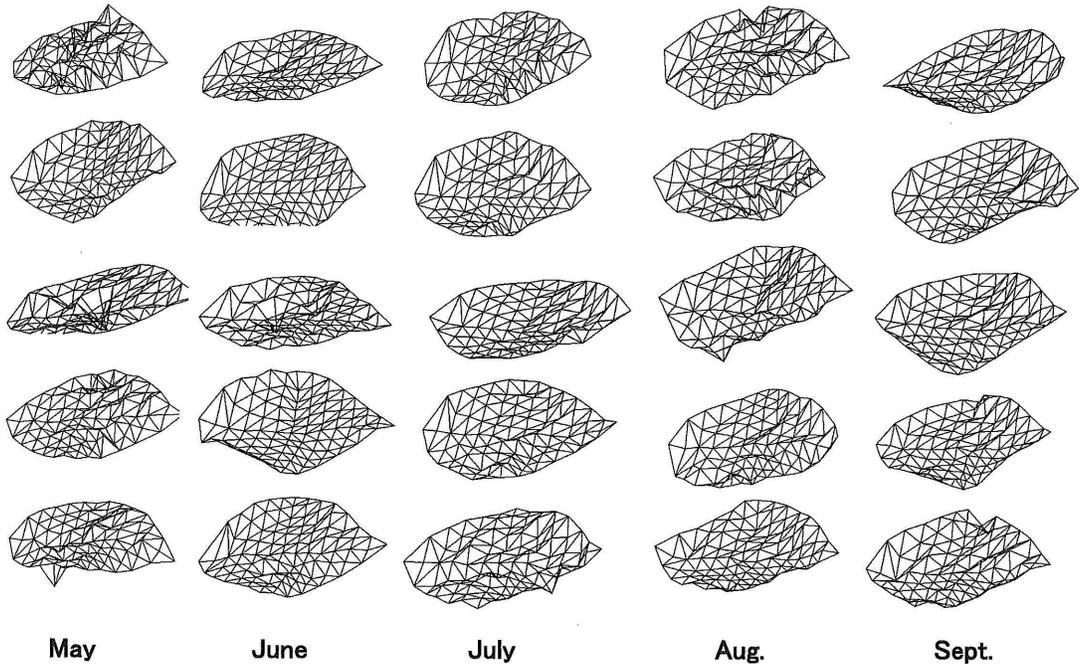


Fig.14 Seasonal changes in wire-frame diagrams of 'Napoleon' leaves.

Table 3 Seasonal changes of mean inclination angle of all triangular sections in the five wire-frame diagrams of non-flat leaves and the variance in several deciduous fruit trees.

Cultivars	Nopoleon		Satonishiki		Fuji		Jonathan		La France		Le Lectier		Hiratanenashi	
	Mean <sup>z</sup>	Variance <sup>y</sup>	Mean	Variance	Mean	Variance	Mean	Variance	Mean	Variance	Mean	Variance	Mean	Variance
May	32.9	341.2	33.1	289.0	34.3	335.1	32.8	295.9	32.9	341.2	28.4	270.3	41.3	421.8
June	21.3	156.9	21.8	325.0	30.3	386.7	18.6	212.1	21.3	156.9	23.8	262.7	35.6	448.9
July	30.5	215.5	35.3	291.8	28.8	279.4	34.2	340.8	30.5	215.5	32.4	416.7	35.6	421.5
Aug.	34.7	263.5	32.2	275.0	36.9	401.1	30.0	306.8	34.7	263.5	26.2	247.7	40.5	382.3
Sept.	30.1	246.4	31.3	308.6	32.0	299.2	27.6	269.0	30.1	246.4	29.0	262.4	37.5	451.3

<sup>z</sup>Mean inclination angle (unit: degree) of all triangular sections (169sections × 5 leaves).

<sup>y</sup>Variance of inclination angle (unit: degree<sup>2</sup>) of all triangular sections (169sections × 5 leaves).

## 2) 葉面傾斜角度分布と新梢の傾きの関係

新梢の写真を種々の角度で人為的に回転したとき、その着生葉の傾斜角度も大きく変わることは一目瞭然である(第19図)。ただし、これはもともと水平の新梢を人為的に突然傾けた場合である。実際の新梢が様々な傾きをもつことは、新梢の原基であった葉芽の姿勢に強く影響されるためである。新梢の伸長に伴って、その着生葉も展葉過程で新梢の傾きと葉序に強く影響され、かつ、周辺の光環境などに影響されながら、最終的に自らの葉面傾斜角度を決める。従って、新梢の傾きと葉面傾斜角度分布の関係を明らかにするためには、実際に調査する

必要がある。

ワイヤーフレーム回転法を用いた葉面傾斜角度分布と新梢角度の関係を第20～24図に示した。全三角形区分の平均値から判断して、'ふじ'、'ラ・フランス'および'佐藤錦'では、新梢の傾きが大きくなるほど葉面傾斜角度は小さくなる傾向が認められた(第20、22および23図)。'平核無'でも同様の傾向が認められたが、他の品種と比べると分散値の変動幅が幾分か小さかった(第24図)。'ル・レクチュ'や'紅玉'についても似た傾向が見られたが省略する。

リンゴ 'ふじ'の平坦部内三角形区分の平均値と新梢角

Table 4 Means and variances of leaf inclination angle with the different height in several deciduous fruit trees in August. The abbreviations refer to Table 2.

Fruit species	Cultivars	Free forms	Heights (m)	Mean (degree)	Variance (degree <sup>2</sup> )	Heights (m)	Mean (degree)	Variance (degree <sup>2</sup> )
Apple	SD	Dwarf • CL	3.0-2.4	19.82	182.1	1.5-1.2	27.83	392.1
			2.4-2.1	19.02	168.9	1.2-0.9	33.96	509.9
			2.1-1.8	20.78	173.8	0.9-	41.97	225.5
	SD	Semi dwarf • CL	1.8-1.5	23.93	229.9			
			3.3-2.7	21.92	185.4	2.1-1.8	22.80	248.9
			2.7-2.4	23.37	173.4	1.8-	29.78	304.2
	SD	Open center	2.4-2.1	26.99	325.5			
			3.3-2.7	25.06	195.7	2.1-1.8	25.66	373.9
			2.7-2.4	20.95	237.1	1.8-	32.77	256.1
	Fuji	Dwarf • CL	2.4-2.1	24.89	226.7			
			2.7-2.1	16.56	166.5	1.8-1.2	27.02	330.8
	Fuji	Semi dwarf • CL	2.1-1.8	27.07	328.8	1.2-	34.38	346.2
			3.6-3.0	16.39	186.3	2.1-1.8	21.30	178.7
	Fuji	Open center	3.0-2.7	21.03	257.2	1.8-1.5	33.47	480.0
			2.7-2.4	18.77	219.4	1.5-1.2	29.56	416.4
			2.4-2.1	25.16	338.8	1.2-	41.85	396.9
	Mutsu	Dwarf • CL	3.0-2.4	23.15	161.7	1.8-	31.91	485.2
			2.4-1.8	27.02	376.3			
	Mutsu	Semi dwarf • CL	3.0-2.4	19.12	202.3	1.8-1.2	20.67	212.6
			2.4-1.8	24.93	258.0	1.2-	40.87	426.3
	Rall Janet	Open center	2.7-2.1	17.72	197.2	1.5-1.2	29.33	282.2
			2.1-1.8	20.46	185.8	1.2-	24.93	266.9
			1.8-1.5	22.52	186.0			
	Red Spar	Open center	2.7-2.1	23.42	190.9	1.8-1.5	35.53	267.6
2.1-1.8			19.70	198.5	1.5-	34.02	362.6	
Jonathan	Open center	3.0-2.4	19.71	198.0	1.8-1.2	20.18	215.3	
		2.4-1.8	19.00	195.6				
Persimmon	MCL	3.0-2.4	25.06	195.7	1.8-1.5	26.97	378.6	
		2.4-2.1	32.79	398.1	1.5-1.2	28.85	357.2	
		2.1-1.8	30.52	445.5	1.2-	28.87	247.9	
Hiratanenashi	MCL	3.3-2.7	21.87	235.2	2.1-1.5	41.87	261.2	
		2.7-2.4	28.06	230.0	1.5-	49.69	254.5	
		2.4-2.1	24.31	304.9				
Chestnut	Tukuba	MCL	2.1-1.8	37.42	231.2	1.5-1.2	52.09	219.7
			1.8-1.5	43.35	265.5	0.9-	43.53	170.5
	Tanzawa	MCL	3.6-2.7	29.68	230.2	2.4-1.8	22.46	182.4
			2.7-2.4	25.86	193.4	1.8-	34.96	208.4
	Ibuki	MCL	2.1-1.8	23.93	310.8	1.5-1.2	43.29	220.3
			1.8-1.5	36.40	376.4			
Walnut	Shinrei	MCL	3.3-2.7	28.91	363.6	2.1-1.5	35.22	316.0
			2.7-2.1	34.58	302.1	1.5-	46.16	429.7
	Yorei	MCL	2.7-2.1	45.47	336.7	1.5-	54.73	236.7
			2.1-1.5	37.66	257.9			
	Banshun	MCL	3.6-3.0	34.02	316.9	2.7-2.1	36.82	172.0
			3.0-2.7	38.53	246.3	2.1-	36.02	253.2
Peach	Okubo	Open center	2.4-1.8	42.31	581.7	1.8-	42.55	547.9
			-2.1	47.11	345.6	1.5-	48.56	349.0
	Hakuho	Open center	2.1-1.5	58.04	468.5			
			-2.4	52.11	455.5	1.8-	50.92	354.6
Cherry	RB	Open center	2.4-1.8	55.54	442.6			
			2.7-2.1	52.95	390.7	1.5-0.6	55.06	220.7
	Satonishiki	Open center	2.1-1.5	54.80	239.7			
			2.4-2.1	28.00	225.6	1.8-1.5	57.65	377.5
	Napoleon	Open center	2.1-1.8	41.20	382.5	1.5-1.2	57.65	377.5
			3.3-2.7	33.65	470.0	2.1-	51.73	389.6
Japanese pear	Shinseiki	Trellis training	2.7-2.1	42.45	383.6			
			2.4-1.8	28.15	313.0	1.8-	44.52	565.4
	Shinsui	Trellis training	2.4-1.8	51.81	561.5	1.8-	40.70	617.4
			2.7-2.1	23.14	225.4	1.8-1.2	38.80	447.9
Pear	Bartlett	Trellis training	2.1-1.8	30.40	375.8			
			2.4-1.8	17.55	159.3	1.8-1.2	51.07	418.5

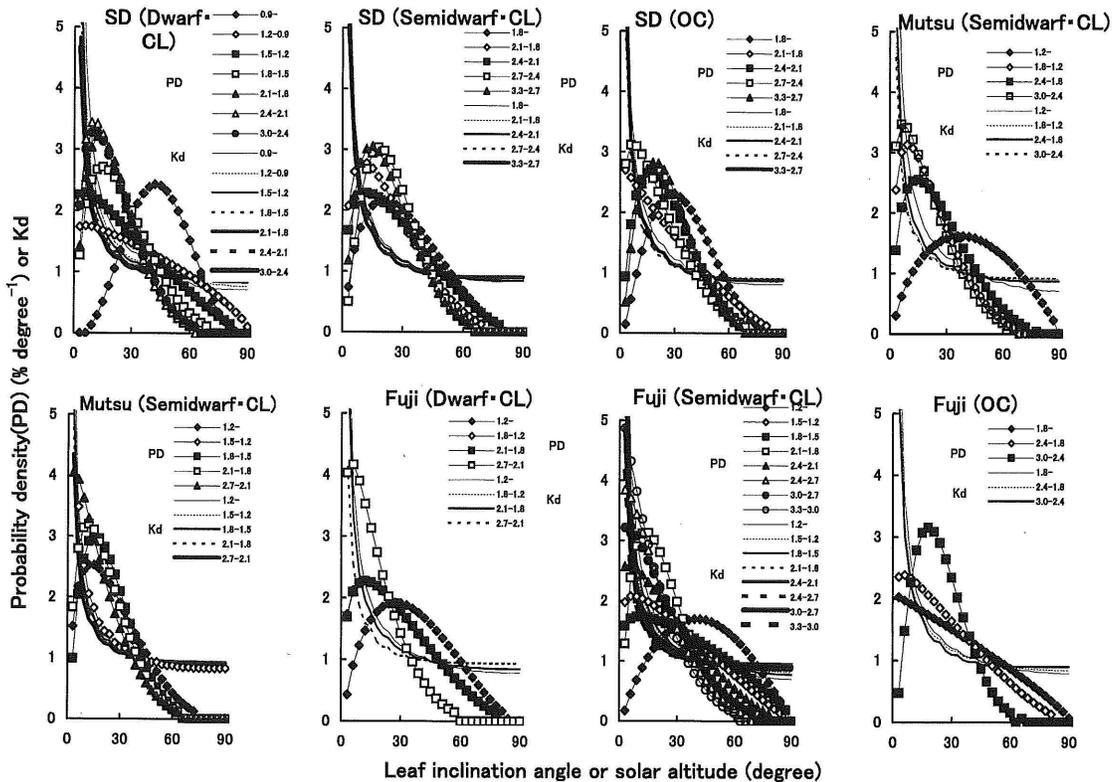


Fig.15 Probability densities of leaf inclination angle and extinction coefficients of direct beam at different height within tree crowns of apple in August. The abbreviations of tree shape refer to Table 2.

度の関係は全三角形区分のそれと大きな違いはなかった(第21図)。他の品種については省略する。

なお、葉面の種類により標本数が異なったため、分散の計算原理から分散値は全三角形区分>平坦部内三角形区分の関係になった(第20, 21図)。

品種、月および葉面の種類(全三角形区分および平坦部内三角形区分)ごとに、新梢角度の6乗までのべき値を説明変数とした傾斜角度の平均値の重回帰式、および新梢角度の3乗までのべき値、同平均値の3乗までのべき値および上記2者の交互作用項を説明変数とした傾斜角度の分散値の重回帰推定式を第5~8表に示した。

まず全三角形区分について見ると、'ナポレオン'では平均値、分散値ともにほとんどの時期において有意な推定式が得られた(第6, 8表)。'紅玉'と'佐藤錦'では平均値でいずれの時期において有意な推定式が得られた(第5, 6表)。'ふじ'は9月を除いて平均値、分散値ともに有意な推定式が得られた(第5, 7表)。'ラ・フランス'は5月の平均値を除いて、平均値、分散値ともに有意な推定

式が得られた(第5, 7表)。'ル・レクチェ'は平均値、分散値ともに6割程度の有意な推定式が得られた(第5, 7表)。'平核無'は平均値・分散値ともにいずれの時期において有意な推定式が得られた(第6, 8表)。

平坦部の三角形区分について見ると、'ナポレオン'は9月の分散値を除いて有意な推定式が得られた(第6, 8表)。'佐藤錦'の分散値では有意な推定式は少なかった(第8表)。'ふじ'、'紅玉'および'ル・レクチェ'では平均値、分散値ともに7割程度の有意な推定式が得られた(第5, 7表)。'ラ・フランス'では平均値、分散値ともに5月の平坦部で有意な推定式が得られなかった(第5, 7表)。'平核無'は5, 6, 7月の分散値を除いて有意な推定式が得られた(第6, 8表)。

上記の重回帰推定式を用いて、新梢の傾きの全範囲における葉面傾斜角度分布を推定し、その3次元グラフの一例を示した(第25図)。第25図には、新梢先端が地面を向くほど葉面傾斜角度は大きくなり(直立葉が多くなり)、一方、新梢が天空を向き、その傾きが大きいほど

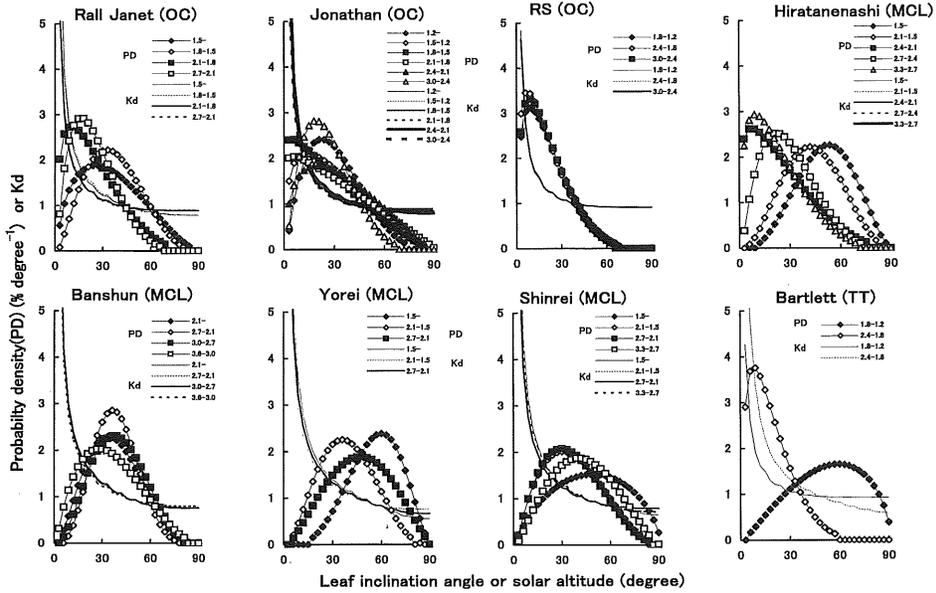


Fig.16 Probability densities of leaf inclination angle and extinction coefficients of direct beam at different height within tree crowns of apple, persimmon, walnut and pear in August. The abbreviations of tree shape refer to Table 2.

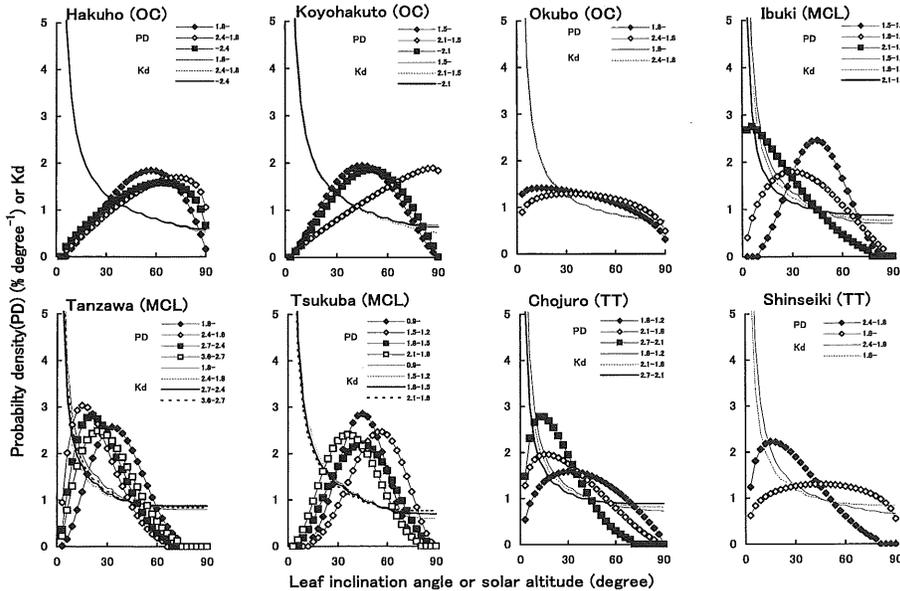


Fig.17 Probability densities of leaf inclination angle and extinction coefficients of direct beam at different height within tree crowns of peach, walnut, and Japanese pear in August. The abbreviations of tree shape refer to Table 2.

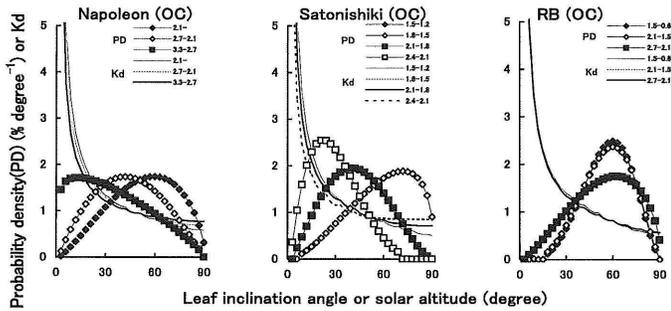


Fig.18 Probability densities of leaf inclination angle and extinction coefficients of direct beam at different height within tree crowns of cherry in August. The abbreviations of tree shape refer to Table 2. RB indicates 'Rockport Bigarreau'.

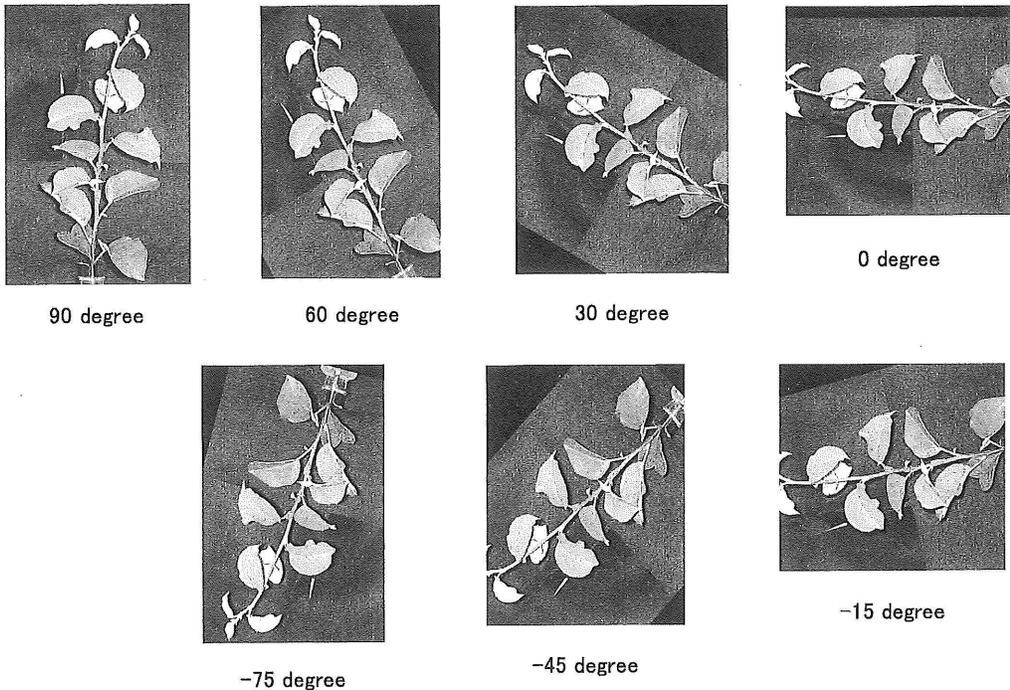


Fig.19 Rotations of a 'Fuji' shoot photograph using various angles.

葉面傾斜角度は小さくなる（水平の葉が多くなる）ことが推定されている。ただし、全三角形区分では新梢の傾きの全範囲において山型分布を描き（第25図左），平坦部三角形区分では全三角形区分の場合よりも勾配の急な山型分布を描いた（第25図右）。他の品種については省略したが，いずれの品種でも新梢が立つほど葉面傾斜角度は小さい方に分布するという共通の傾向が推定された。

3) 冬季の樹体写真における新梢角度の調査結果を用いた樹冠内高さ別葉面傾斜角度分布の解析結果

リンゴ 'ふじ'の樹冠内各高さにおける新梢の傾きの調査結果と2)の重回帰式とを用い，樹冠内高さ別葉面傾斜角度分布を解析したところ（第26図），葉面傾斜角度の平均値は樹冠内部位が高くなるほど小さく，水平な葉が多いという傾向が認められ，葉面傾斜角度平均値は40度から50度にかけて分布した（第26図）。これに対し，

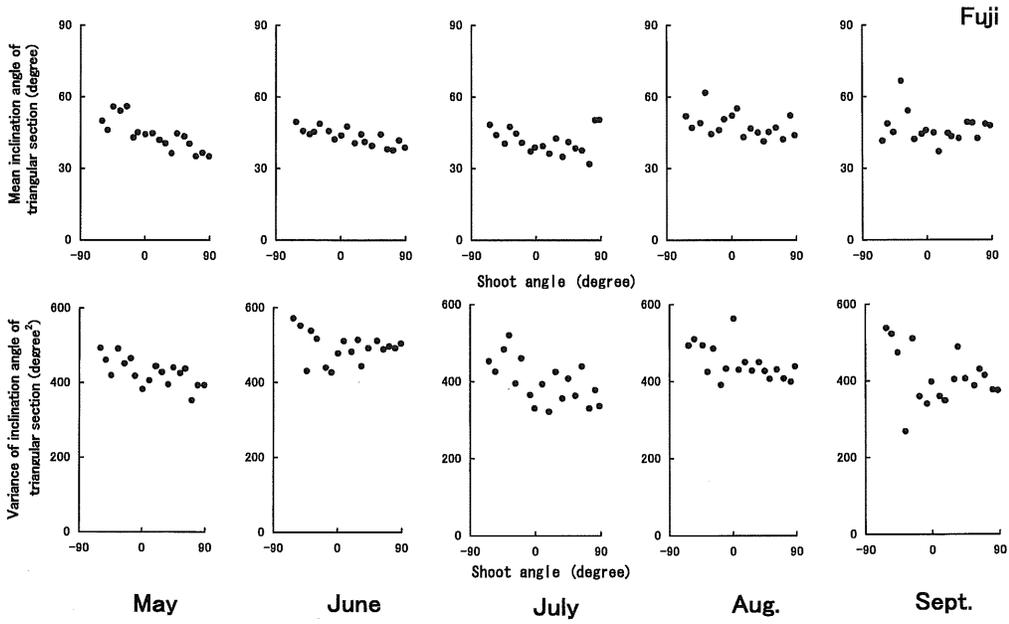


Fig.20 Relations between shoot angles and mean inclination angles of triangular sections (upper) and the variances (lower) of non-flat leaves in 'Fuji'.

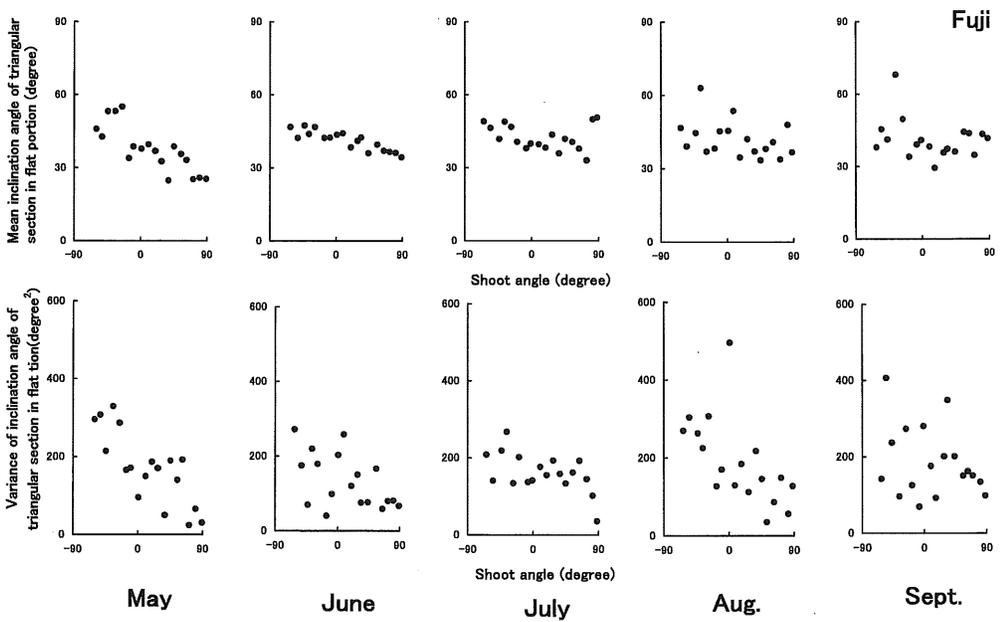


Fig.21 Relations between shoot angles and mean inclination angles of triangular sections in flat portions (upper) and the variances (lower) of non-flat leaves in 'Fuji'.

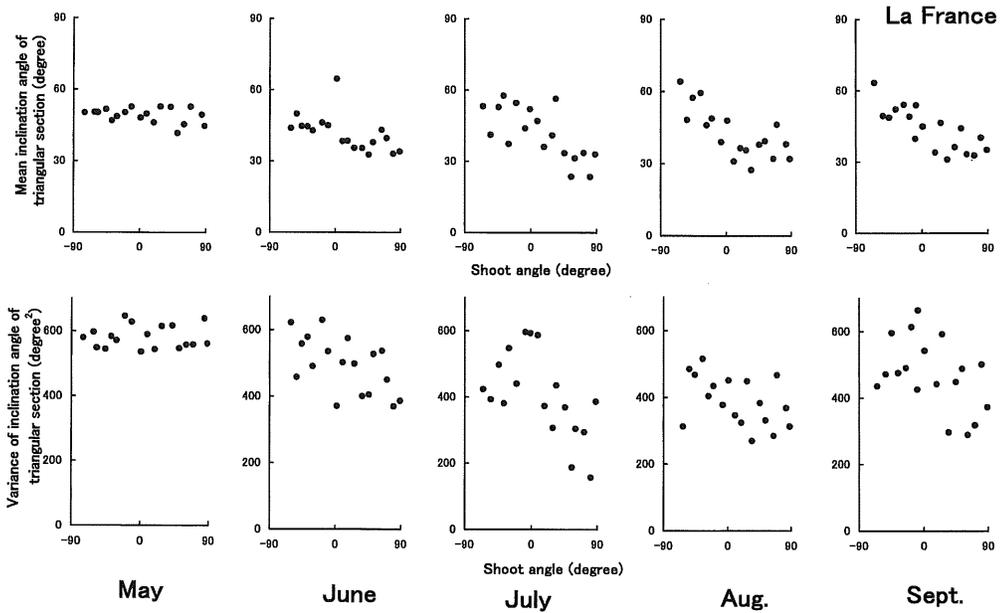


Fig.22 Relations between shoot angles and mean inclination angles of triangular sections (upper) and the variances (lower) of non-flat leaves in 'La France'.

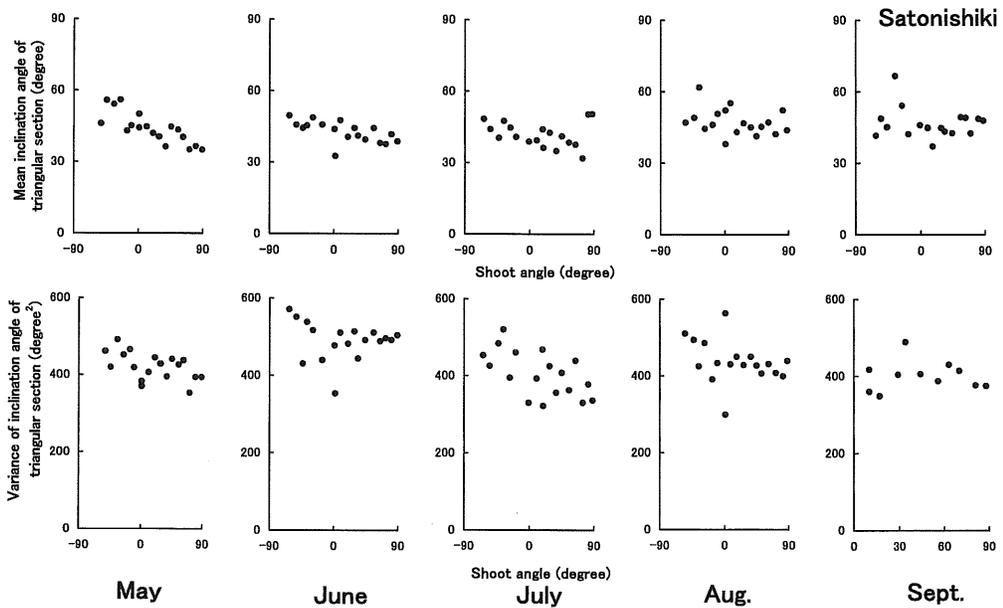


Fig.23 Relations between shoot angles and mean inclination angles of triangular sections (upper) and the variances (lower) of non-flat leaves in 'Satonishiki'.

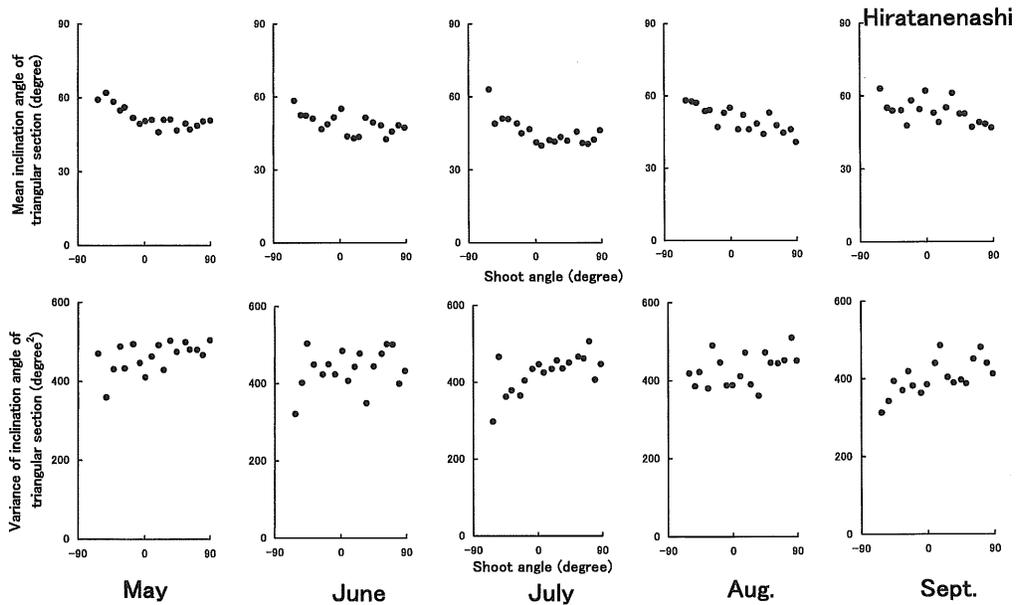


Fig.24 Relations between shoot angles and mean inclination angles of triangular sections (upper) and the variances (lower) of non-flat leaves in 'Hiratanenashi'.

カキ'平核無'は樹冠の上部・下部といった高さによる変化が少なく、三角形区分の平均値では45度付近に分布した(第27図)。他のリンゴ、セイヨウナシおよびオウトウの樹冠内高さ別葉面傾斜角度分布はリンゴ'ふじ'に似た傾向が見られた(第27図)。

### 考 察

緒言に記したように、本研究目的は果樹樹冠内放射分布に密接に関係する葉面傾斜角度分布の収集であり、その目的をほぼ達成できたと考えられる。これをふまえ、ここでは、最初に調査手法、実験結果の中味および果樹の光環境改善に役立てる部分を順に考察したい。

葉面傾斜角度の実測方法としては、一般的にはリーフクリノメーター法(坪井, 1974)が用いられるが、これは長い葉をもつ草本を対象にするときは便利であるが、果樹のような小さい葉で、かつ、高所測定では、本実験に用いた錘糸付分度器法が適していると考えられる。

葉面傾斜角度分布のリモート計測法あるいは間接測定法には、プラントキャノピーアナライザ法(Welles and Norman, 1991)、三次元視覚法(Ivanovら, 1994)、

Inclined Point Quadrat法(Wilson and Warren, 1963)、反射偏光法(Shibayama and Watanabe, 2007)、マルチバンドの反射偏光法(Shibayama, 2006)があり、いずれも葉面傾斜角度以外の計測も兼ねている。ただし、これらの手法において、湾曲葉の傾斜角度の計測可能性については明らかでない。また、本来の計測目的が葉面積指数(LAI)であるプラントキャノピーアナライザ(LAI2000)に付随している平均葉面傾斜角度の計測機能については、筆者らもこれに注目して本研究の一環として用いたが、果樹のような離散型の植被では計測がかなり制限され、異常値が多く発生した。

筆者らが考察した湾曲葉面の傾斜角度分布に関する2つの計測法のうち、画像計算値当てはめ法による計測はリモート計測法であり、果樹園でも一応可能であると断定できた。しかし、検証実験結果(第13図)および現場における撮影や画像解析(第3, 4図)などのための所要労力や時間を考慮すると効率的とは言えなかった。その原理上、原ワイヤーフレーム図の膨大な数の回転図形の中から対象葉の2値化画像に最も似たものを捜すようになっていたため(第3, 4図)、以下の推定誤差を伴うものと考えられる。すなわち、個々の撮影葉には、程度の

Table 5 Results of multiple regression analysis of mean leaf inclination angle (B) of non-flat leaves using shoot angle (A) in apple and pear.

Month	Object	$R^{2z}$	$Re^y$	$F$ value	Significance <sup>x</sup>	Formula
Fuji						
5	WL <sup>w</sup>	0.6726	3.888	32.87	$P < 0.0001$	$B = -0.1149A + 45.72$
5	FP <sup>v</sup>	0.6627	5.735	31.43	$P < 0.0001$	$B = -0.1658A + 40.07$
6	WL	0.6143	2.284	25.48	$P < 0.0001$	$B = -0.05844A + 44.12$
6	FP	0.7749	1.976	55.08	$P < 0.0001$	$B = -0.07433A + 42.25$
7	WL	0.5639	3.725	9.70	$P < 0.0020$	$B = 0.00000000003814A^6 - 0.07816A + 40.03$
7	FP	0.5545	3.679	9.34	$P < 0.0023$	$B = 0.00000000003606A^6 - 0.08123A + 41.26$
8	WL	0.1720	4.855	3.32	$P < 0.0871$	$B = -0.04492A + 48.67$
8	FP					Not obtained. $B = 42.13$
9	WL					Not obtained. $B = 46.54$
9	FP					Not obtained. $B = 41.19$
Jonathan						
5	WL	0.7538	5.556	9.95	$P < 0.0007$	$B = 0.0000000004810A^6 - 0.00000386A^4 - 0.00003237A^3 + 0.00817A^2 + 41.52$
5	FP	0.5170	4.245	17.13	$P < 0.0008$	$B = -0.09001A + 42.88$
6	WL	0.3105	7.314	7.20	$P < 0.0163$	$B = -0.098562A + 36.17$
6	FP					Not obtained. $B = 37.60$
7	WL	0.3541	3.509	8.77	$P < 0.0092$	$B = -0.05250A + 44.89$
7	FP	0.2763	4.017	2.86	$P < 0.0884$	$B = -0.000000002372A^5 + 0.001030A^2 + 40.44$
8	WL	0.4568	3.022	13.46	$P < 0.0021$	$B = -0.05658A + 45.63$
8	FP	0.2676	3.993	5.85	$P < 0.0279$	$B = -0.04927A + 43.47$
9	WL	0.7163	3.134	18.94	$P < 0.0001$	$B = 0.00000000002878A^6 - 0.1229A + 42.88$
9	FP	0.7395	4.210	21.29	$P < 0.0001$	$B = 0.00000000003977A^6 - 0.1751A + 37.53$
La France						
5	WL					Not obtained. $B = 49.16$
5	FP					Not obtained. $B = 58.47$
6	WL	0.3067	6.514	7.08	$P < 0.0171$	$B = -0.08767A + 42.85$
6	FP	0.2864	7.218	6.42	$P < 0.0221$	$B = -0.09255A + 40.65$
7	WL	0.4965	8.054	15.78	$P < 0.0011$	$B = -0.1608A + 43.87$
7	FP	0.4943	8.697	15.64	$P < 0.0011$	$B = -0.1729A + 42.80$
8	WL	0.6844	6.212	16.26	$P < 0.0002$	$B = 0.002020A^2 - 0.2117A + 40.70$
8	FP	0.6271	7.731	12.62	$P < 0.0006$	$B = 0.001720A^2 - 0.2283A + 44.61$
9	WL	0.6236	5.755	26.51	$P < 0.0001$	$B = -0.1495A + 45.71$
9	FP	0.6025	6.436	24.25	$P < 0.0002$	$B = -0.1599A + 48.35$
Le Lectier						
5	WL	0.4454	3.185	6.02	$P < 0.0120$	$B = -0.00001560A^3 + 0.0008442A^2 + 53.61$
5	FP	0.4120	3.841	5.25	$P < 0.0186$	$B = -0.000000004118A^5 + 0.0000002688A^4 + 57.38$
6	WL	0.5127	6.625	16.84	$P < 0.0008$	$B = -0.00002868A^3 + 51.98$
6	FP	0.3582	5.823	8.93	$P < 0.0087$	$B = -0.00001836A^3 + 51.74$
7	WL	0.5362	3.616	18.50	$P < 0.0005$	$B = -0.07827A + 51.64$
7	FP	0.3441	2.478	8.39	$P < 0.0105$	$B = -0.03613A + 54.21$
8	WL					Not obtained. $C = 47.06$
8	FP					Not obtained. $C = 49.30$
9	WL	0.3887	5.234	10.18	$P < 0.0057$	$B = -0.001740A^2 + 46.61$
9	FP	0.3370	6.273	8.13	$P < 0.0115$	$B = -0.001872A^2 + 47.91$

<sup>z</sup>Coefficient of determination.

<sup>y</sup>Standard deviation of estimation residue.

<sup>x</sup> $F$ -test.

<sup>w</sup>Triangular sections in a whole leaf.

<sup>v</sup>Triangular sections in a flat portion.

Table 6 Results of multiple regression analysis of mean leaf inclination angle (B) of non-flat leaves using shoot angle (A) in cherry and persimmon. Symbols refer to Table 5.

Month	Object	$R^2$	Re	F value	Significance	Formula
<b>Satonishiki</b>						
5	WL	0.3965	5.463	10.51	$P < 0.0051$	$B = -0.09029A + 44.66$
5	FP	0.3883	5.586	10.16	$P < 0.0057$	$B = -0.09073A + 44.96$
6	WL	0.5841	6.742	10.53	$P < 0.0014$	$B = 0.000000004722A^5 - 0.2353A + 39.18$
6	FP	0.5869	7.055	10.65	$P < 0.0013$	$B = 0.000000005018A^5 - 0.2479A + 40.51$
7	WL	0.7609	3.773	50.91	$P < 0.0001$	$B = -0.1378A + 48.95$
7	FP	0.7482	5.304	47.55	$P < 0.0001$	$B = -0.1872A + 45.00$
8	WL	0.6404	4.972	8.31	$P < 0.0020$	$B = 0.000000003381A^5 - 0.002670A^2 - 0.1119A + 51.61$
8	FP	0.6549	5.454	8.86	$P < 0.0015$	$B = 0.00004267A^3 - 0.002951A^2 - 0.2210A + 57.11$
9	WL	0.4627	3.959	13.78	$P < 0.0019$	$B = -0.07513A + 44.69$
9	FP	0.4997	4.716	15.98	$P < 0.0010$	$B = -0.09639A + 48.51$
<b>Napoleon</b>						
5	WL	0.7075	3.362	18.85	$P < 0.0001$	$B = -0.001313A^2 - 0.05275A + 54.43$
5	FP	0.6813	4.266	16.04	$P < 0.0002$	$B = -0.001791A^2 - 0.05050A + 55.56$
6	WL	0.6705	7.516	9.50	$P < 0.0011$	$B = -0.0000005817A^4 + 0.0001026A^3 - 0.4860A + 41.77$
6	FP	0.6703	8.958	9.49	$P < 0.0011$	$B = -0.0000006732A^4 + 0.0001177A^3 - 0.5686A + 41.07$
7	WL	0.3150	4.778	7.36	$P < 0.0154$	$B = -0.06535A + 45.30$
7	FP	0.2887	5.469	6.50	$P < 0.0215$	$B = -0.07028A + 43.19$
8	WL	0.4657	6.229	13.95	$P < 0.0018$	$B = -0.1189A + 51.17$
8	FP	0.5102	6.559	16.67	$P < 0.0009$	$B = -0.1368A + 51.23$
9	WL	0.4678	3.710	14.07	$P < 0.0017$	$B = -0.07026A + 47.19$
9	FP	0.4112	4.729	11.18	$P < 0.0041$	$B = -0.07985A + 44.68$
<b>Hiratanenashi</b>						
5	WL	0.8367	1.918	38.43	$P < 0.0001$	$B = 0.001131A^2 - 0.1042A + 50.83$
5	FP	0.8017	3.357	30.32	$P < 0.0001$	$B = 0.001947A^2 - 0.1618A + 43.39$
6	WL	0.4341	3.485	5.75	$P < 0.0140$	$B = 0.0007439A^2 - 0.07160A + 48.16$
6	FP	0.3116	3.665	7.24	$P < 0.0161$	$B = -0.05032A + 52.41$
7	WL	0.7746	2.852	25.77	$P < 0.0001$	$B = 0.001596A^2 - 0.1214A + 43.50$
7	FP	0.7995	4.242	29.91	$P < 0.0001$	$B = 0.002790A^2 - 0.1919A + 31.70$
8	WL	0.6658	3.117	31.87	$P < 0.0001$	$B = -0.08913A + 51.45$
8	FP	0.6301	2.343	27.25	$P < 0.0001$	$B = -0.06196A + 52.37$
9	WL	0.4128	4.003	11.25	$P < 0.0040$	$B = -0.00001408A^3 + 54.76$
9	FP	0.4450	5.064	12.83	$P < 0.0025$	$B = -0.00001903A^3 + 50.51$

差こそあれ、形状、大小、湾曲程度などの微妙な違いが存在する一方、回転する図形は1個の平均的な原ワイヤーフレーム図を用いるため、結果的に実際とは異なった回転角度の組み合わせを捜し当てる危険性は否定できない。また、画像処理上の誤差も伴うものと考えられる。ワイヤーフレーム回転法(第5図)は半リモート計測法と言えるが、現場における撮影を必要とせず、また、葉姿勢の計測誤差だけが問題になる。従って、この計測さえ正確に行えば誤差が少なくできる。幸運にもこの計測は非常に簡単であった。加えて、複数の原ワイヤーフレーム図を用い、推定葉ごと乱数により1個を選びながら回転するので(第5図)、画像計算値当てはめ法のときのような推定誤差は減少するものと考えられる。

葉面を一枚の平板と見なしときの葉面傾斜角度分布の調査結果から、測定時が夏季に限定されたきらいはあったものの、樹種、品種の特徴が収集できたものと考えられる(第10, 11図, 第2表)。葉面傾斜角度分布は樹種の遺伝的性格を強く反映するものと考えられるが、同じ樹種でも品種によって相当異なることも否定できない。たとえば、カキ'西条'の葉は著しく下垂することが知られているが、分布型でいえば強い直立型になるだろう。第8図から判るように、強い直立型(V)ないし直立型(IV)では太陽高度が高くなる昼間に直達光割合( $I/I_0$ )が他の型に比べて高くなり、同一のLAI条件下でも光環境の改善にとって有利であることが推察される。従って、光環境改善にとって有利な果樹品種を育成する

Table 7 Results of multiple regression analysis of variance of leaf inclination angle (C) of non-flat leaves using shoot angle (A) and mean leaf inclination angle (B) in apple and pear. Symbols refer to Table 5.

	Month	Object	$R^2$	Re	F value	Significance	Formula
Fuji	5	WL	0.4418	28.73	12.67	$P < 0.0026$	$C = -0.5271A + 435.8$
	5	FP	0.7788	46.97	26.40	$P < 0.0001$	$C = -0.001620B^3 + 16.29B - 340.9$
	6	WL	0.4329	32.07	5.73	$P < 0.0142$	$C = 0.001283B^3 + 0.009421A^2 + 365.7$
	6	FP	0.3175	61.48	7.44	$P < 0.0149$	$C = 10.06B - 282.0$
	7	WL	0.3404	47.99	8.26	$P < 0.0110$	$C = -0.6926A + 408.9$
	7	FP	0.437	39.02	12.43	$P < 0.0028$	$C = -0.0001380A^3 + 174.0$
	8	WL	0.2931	38.69	6.63	$P < 0.0203$	$C = -0.5057A + 455.1$
	8	FP	0.3708	90.50	9.43	$P < 0.0073$	$C = -1.410A + 208.2$
	9	WL					Not obtained. C=411.5
9	FP					Not obtained. C=186.1	
Jonathan	5	WL	0.5943	31.25	4.76	$P < 0.0138$	$C = 4.944B - 0.0002610A^3 + 2.657A - 0.03774AB + 193.9$
	5	FP	0.6168	39.78	7.51	$P < 0.0031$	$C = 7.699B - 0.01447A^2 + 0.5850A - 173.1$
	6	WL	0.3175	59.07	7.44	$P < 0.0149$	$C = -0.8091A + 307.5$
	6	FP					Not obtained. C=180.2
	7	WL					Not obtained. C=392.0
	7	FP					Not obtained. C=135.6
	8	WL	0.5058	43.51	3.33	$P < 0.0439$	$C = 0.004009B^3 - 0.0002427A^3 + 12.67A - 0.2294AB + 11.69$
	8	FP	0.4798	51.83	6.92	$P < 0.0074$	$C = 0.001793B^3 + 0.01056A^2 - 26.33$
	9	WL	0.2562	47.53	5.51	$P < 0.0321$	$C = -0.01267AB + 401.7$
9	FP	0.2723	88.79	5.99	$P < 0.0264$	$C = -0.0002211A^3 + 201.7$	
La France	5	WL	0.2307	31.90	4.80	$P < 0.0436$	$C = -0.05578B^2 + 446.0$
	5	FP					Not obtained. C=150.4
	6	WL	0.7484	48.07	9.67	$P < 0.0007$	$C = -0.003324B^3 + 20.25B - 6.616A + 0.1471AB - 50.91$
	6	FP	0.2919	73.32	6.60	$P < 0.0206$	$C = -0.9526A + 138.7$
	7	WL	0.6698	78.65	15.21	$P < 0.0002$	$C = -0.005040B^3 + 34.46B - 596.2$
	7	FP	0.5861	115.0	6.61	$P < 0.0052$	$C = 0.0004818A^3 - 10.96A + 0.1913AB + 320.8$
	8	WL	0.6485	46.93	13.84	$P < 0.0004$	$C = -0.006244B^3 + 0.48684B^2 + 22.44$
	8	FP	0.4836	60.94	7.02	$P < 0.0070$	$C = -0.001521B^3 + 14.86B - 354.6$
	9	WL	0.7292	59.46	20.20	$P < 0.0001$	$C = -0.7128B^2 + 71.91B - 1256$
9	FP	0.6208	40.40	7.64	$P < 0.0029$	$C = 0.0002229A^3 - 0.01274A^2 + 6.237B - 134.8$	
Le Lectier	5	WL	0.3854	45.04	4.70	$P < 0.0260$	$C = -0.009143B^3 + 77.66B - 2199$
	5	FP	0.3326	82.46	7.97	$P < 0.0122$	$C = -0.001160B^3 + 411.1$
	6	WL					Not obtained. C=480.3
	6	FP	0.2628	66.06	5.70	$P < 0.0296$	$C = 0.01706AB + 117.0$
	7	WL					Not obtained. C=508.1
	7	FP	0.2150	30.25	4.38	$P < 0.0526$	$C = -5.174B + 355.3$
	8	WL					Not obtained. C=425.9
	8	FP	0.4775	58.88	14.62	$P < 0.0015$	$C = -0.0007409B^3 + 254.7$
	9	WL	0.7009	45.49	10.94	$P < 0.0006$	$C = -0.8184B^2 + 80.36B + 0.02512AB - 1446$
9	FP	0.4358	70.15	5.79	$P < 0.0137$	$C = -0.0003766A^3 + 0.02561A^2 + 117.6$	

Table 8 Results of multiple regression analysis of variance of leaf inclination angle (C) of non-flat leaves using shoot angle (A) and mean leaf inclination angle (B) in cherry and persimmon. Symbols refer to Table 5.

Month	Object	$R^2$	Re	F value	Significance	Formula
Satonishiki						
5	WL	0.3575	47.56	8.90	$P < 0.0088$	$C = 5.0434B + 133.7$
5	FP	0.5086	57.49	16.56	$P < 0.0009$	$C = 0.001211B^3 + 4.385$
6	WL					Not obtained. $C = 348.8$
6	FP					Not obtained. $C = 179.8$
7	WL					Not obtained. $C = 405.4$
7	FP					Not obtained. $C = 144.9$
8	WL	0.4977	45.35	7.43	$P < 0.0057$	$C = -0.004573B^3 + 33.26B - 666.1$
8	FP					Not obtained. $C = 122.1$
9	WL					Not obtained. $C = 422.3$
9	FP					Not obtained. $C = 100.8$
Napoleon						
5	WL	0.6792	20.18	15.88	$P < 0.0002$	$C = -0.0001113A^3 - 0.0008127B^3 + 573.4$
5	FP	0.5092	47.14	7.78	$P < 0.0048$	$C = -0.0002408A^3 - 0.0007280B + 257.2$
6	WL	0.3270	66.56	3.64	$P < 0.0513$	$C = -3.847A + 0.08688AB + 286.0$
6	FP	0.4140	96.81	3.30	$P < 0.0519$	$C = 0.02017A^2 - 6.007A + 0.1313AB + 152.9$
7	WL	0.7928	28.01	28.71	$P < 0.0001$	$C = -0.9385B^2 + 91.27B - 1765$
7	FP	0.6224	25.13	12.36	$P < 0.0007$	$C = 0.007382B^3 - 0.4186B^2 + 250.5$
8	WL	0.4398	38.30	5.89	$P < 0.0130$	$C = -0.3554B^2 + 36.80B - 538.2$
8	FP	0.2607	54.18	5.64	$P < 0.0304$	$C = 3.433B - 68.88$
9	WL	0.3311	46.92	3.71	$P < 0.0490$	$C = 5.912B + 0.01855AB + 92.45$
9	FP					Not obtained. $C = 106.1$
Hiratanenashi						
5	WL	0.3493	31.74	8.59	$P < 0.0098$	$C = -0.0005783B^3 + 545.4$
5	FP					Not obtained. $C = 144.1$
6	WL	0.2019	46.71	4.05	$P < 0.0614$	$C = -0.0007012B^3 + 522.5$
6	FP					Not obtained. $C = 141.0$
7	WL	0.6333	30.60	27.64	$P < 0.0001$	$C = -0.06852B^2 + 569.6$
7	FP					Not obtained. $C = 116.1$
8	WL	0.2459	37.60	5.22	$P < 0.0364$	$C = 0.00008700A^3 + 421.6$
8	FP	0.4650	36.34	13.91	$P < 0.0018$	$C = 0.6864A + 87.76$
9	WL	0.6949	27.24	10.63	$P < 0.0007$	$C = -5.192B + 0.009145AB$
9	FP	0.3428	51.65	3.91	$P < 0.0429$	$C = 0.01667AB - 0.01166A^2 + 149.4$

場合、その育種選抜目標に葉の直立型分布をあげることもできよう。

葉面傾斜角度分布の季節的变化（第12図）は総じてあまり大きくないものと考えられるが、本調査は、調査労力の関係から、樹冠底部から頂部までを含む樹冠全体の葉面傾斜角度の季節的变化を調査したものではなく、樹冠底部に限定したものであった。

葉面傾斜角度分布に及ぼす風の影響についてはほとんど調査されていない。筆者らの調査（未発表）によれば、風により葉面傾斜角度が大きく変わった。ただし、風の息により、葉面傾斜角度の修正量は振動するため、樹冠

内光環境に及ぼす影響も振動することが推測される。この影響の仕方については今後、一層の解析を要するが、風による日向部と日陰部の入れ替わりに加えて、Kd値の変動が生じることは光環境の改善にとってマイナスではないものと考えられる。上記以外の要因として、葉面傾斜角度分布と水ストレスの関係について野菜（Fontら、2005）やトマト（Gautierら、1999）で調査されている。また、葉面傾斜角度分布と投射光強度との関係についてはロゼット様植物（Mullenら、2006）や、ダイズ（Bawheyら、2003）で調査されているが、果樹では調査されていない。

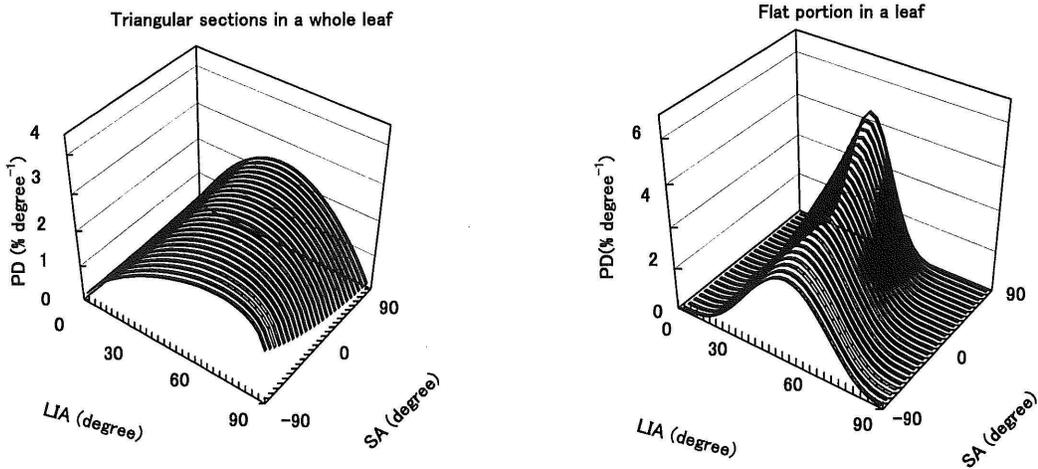


Fig.25 An example of estimated result using the multiple regression formulas, which show relations between shoot angle (SA), leaf inclination angle (LIA) and its probability densities (PD) in all triangular sections (left) and that in flat portions (right) of 'Fuji' in June.

葉面の湾曲についてはこれまで報告されていない。本実験により、落葉果樹葉の湾曲の程度とその季節的变化が初めて明らかになったものと言える(第14図, 第3表)。また、考案された湾曲情報を取り入れた手法を用いて、今後、果樹葉の傾斜角度を調査し、平板と見なしたときの調査結果と比較する必要がある。

葉面傾斜角度分布の樹冠内高さ別違いが見出された(第15~18図)。これは樹冠内変動要因と言える。また、その原因として、新梢の傾きの影響が無視できない(第20~24図)。新梢の傾きと葉の傾斜角度の関係はこれまでほとんど調査されていない。新梢の先が上向くほど葉は水平になり、新梢が水平になるほど葉は直立(下垂)する傾向が多く、多くの果樹で認められた(第20~24図)。

樹体を構成する新梢の傾きから葉面傾斜角度分布を推定した場合、葉面傾斜角度分散値の推定値は葉序なども関わり、非常に複雑であった。しかし、葉面傾斜角度平均値の推定値について見れば、セイヨウナシやリンゴの主幹形、特に樹冠上部の新梢が立っている樹形の場合には、樹冠上層の葉面傾斜角度平均値は小さくなり、水平型分布に偏ることが推察された。これは、光環境を考えた場合にはあまり好ましくない。上層に水平な葉が多い状態では直達光が遮断され、樹冠内部まで光が透過しにくくなる。栽培果樹では整枝剪定が毎年施されるため、枝葉の配置は人工的構造になる。したがって、整枝剪定

や誘引によって、上層の新梢をできるだけねかせ、下層の新梢をできるだけ立てることが可能であれば、上記とは逆の関係になり、直達光が樹冠内部まで浸透し、下層の葉は光を漏らさず受けることが可能になるものと一応考えられる。直立型の葉面傾斜角度分布はKd値を減少させ、直達光の浸透に有利になるにしても、太陽高度が高い時刻における葉面の直達光受光強度は逆に減少する(第9図)。従って、樹冠内光環境に有利な葉面傾斜角度分布を見出すためには、同じ葉量、投射光強度のもとで、葉面放射分布を測定あるいは推定することが必要である。上記のことから、今後の展望として、果樹の樹形構築解析システムCACOAS(山本ら, 2004)を用いて、同じ葉量の条件下で、種々の新梢角度分布を作り出し、これらに着生した葉量の空間分布とその葉面傾斜角度分布を変えたうえで、果樹園光環境解析システム(OLEAS, 山本, 1999)を用いて樹冠内光環境を解析することが必要であろう。このためには、上記の機能を備えるべく、現行のCACOASとOLEASの改良が必要であろう。

### 摘 要

果樹樹冠内放射分布研究の基礎的資料を得るために、数種落葉果樹の葉面傾斜角度分布の実態調査を行なった。葉面を一枚の平板と見なしたときの葉面傾斜角度分布を

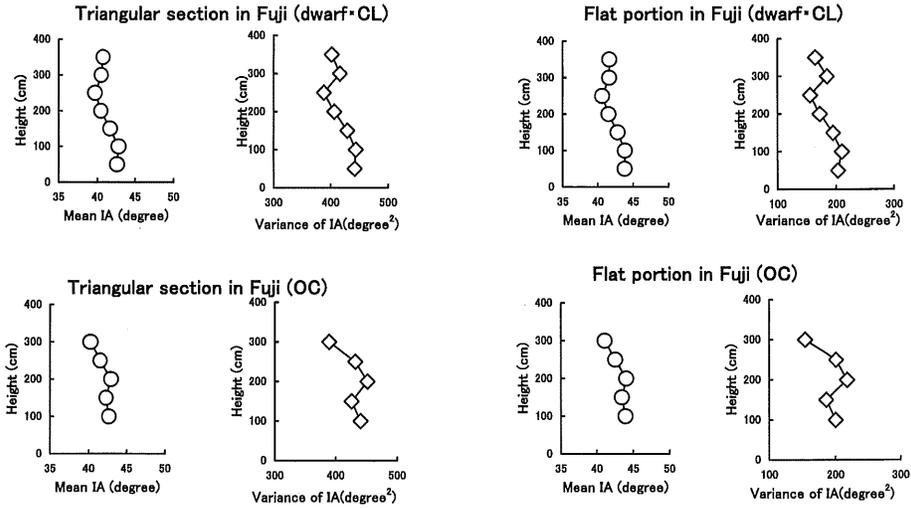


Fig. 26 Estimated mean leaf inclination angle and the variance using the formulas shown in Table 5-8 at various height in the tree crown of 'Fuji' which were read on the tree photographs after leaf fall. Abbreviations of tree form refer to Table 2.

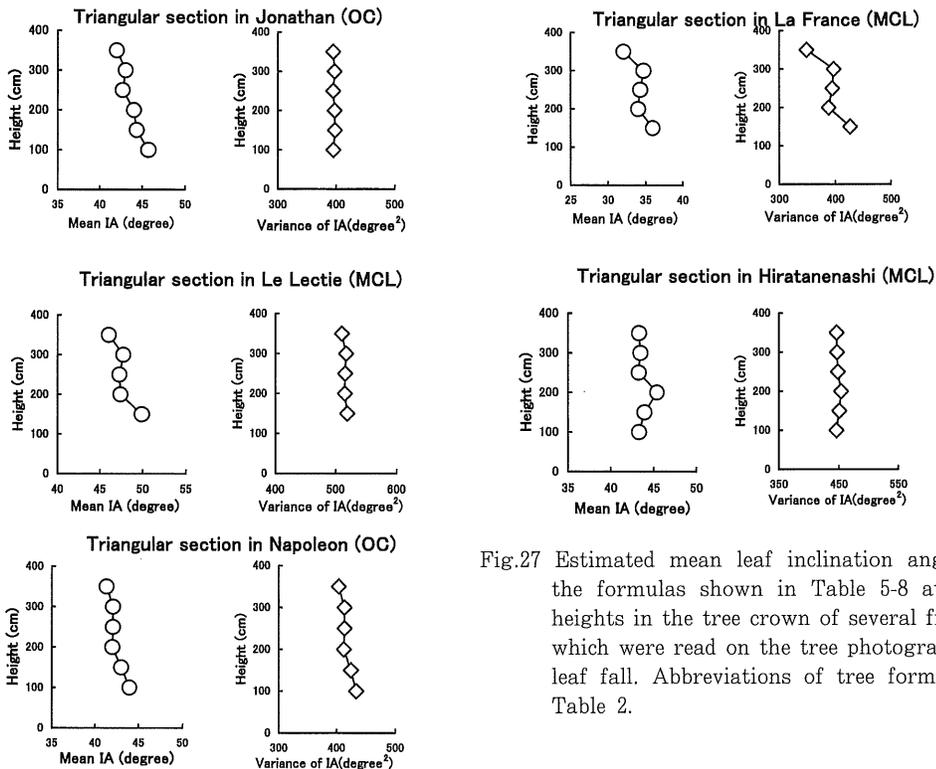


Fig.27 Estimated mean leaf inclination angle using the formulas shown in Table 5-8 at various heights in the tree crown of several fruit trees which were read on the tree photographs after leaf fall. Abbreviations of tree form refer to Table 2.

調査したところ、果樹の葉面傾斜角度分布はベータ分布に良く近似できた。強い水平型にはリンゴの多くの品種、一部のニホンナシとセイヨウナシが含まれた。直立型にはモモとオウトウの一部が含まれ、他の品種は弱い水平型、中間型あるいは均一型に属し、強い直立型は無かった。樹冠内同一葉層の葉面傾斜角度分布を継続して調査したところ、その季節的変動はあまり大きくなかった。葉面上98点の空間座標の立体写真測量を行い、湾曲情報（ワイヤーフレーム図）を入手し、これを取り入れた葉面傾斜角度分布の計測方法を種々検討した。その結果、葉の中肋線およびこれへの垂線の傾斜角度などの簡単な測定結果を用いてワイヤーフレーム図を回転する方法（ワイヤーフレーム図回転法）が有効であった。多くの果樹で、展葉間もない5月と夏季（7, 8月）に湾曲程度が大きくなり、6月と9月には湾曲程度が小さくなった。夏季における樹冠内各高さ別葉面傾斜角度分布を調査したところ、リンゴ（特に主幹形）およびカキでは、樹冠上層ほど水平型が多く、中間層や下層では弱い水平型や中間型が多かった。モモでは樹冠高さによる分布形の変化は少なかった。また、棚仕立てのセイヨウナシやニホンナシでは夏季剪定を欠くと棚上層部に強い水平型が現れた。これらの結果から、葉面傾斜角度分布の樹冠内変動の主要因として新梢の傾きの違いが予想されたので、ワイヤーフレーム図回転法により調査、解析したところ、多くの樹種で新梢が立つほど葉面傾斜角度は小さくなる傾向が認められた。

#### 引用文献

- アジア航測株式会社. 1998. 計測名人 (ADIMS) Ver 0.9.9 チュートリアルマニュアル. アジア航測株式会社. 東京.
- Barclay, H. J. 2001. Distribution of leaf orientations in six conifer species. *Can. J. Bot.* 79: 389-397.
- Bawhey, C. I., R. H. Grant and W. Gao. 2003. Digital measurement of heliotropic leaf response in soybean cultivars and leaf exposure to solar UVB radiation. *Agric. Forest Meteorol.* 120: 161-175.
- Espana, M., F. Baret, F. Aries, B. Andrieu and M. Chelle. 1999. Radiative transfer sensitivity to the accuracy of canopy structure description. The case of a maize canopy. *Agronomie* 19: 241-254.
- Font, L., F. Korosi and I. Farkas. 2005. Leaf inclination based non destructive water stress indication for vegetables. *Acta Horticulturae.* 691: 99-105.
- Gautier, H., M. Tchamitchian and S. Guichard. 1999. Effects of decreasing VPD by misting on leaf area and leaf inclination in tomato and estimation of consequences on light absorption. *Acta Horticulturae.* 507: 77-84.
- Gratani, L. and A. Bombelli. 1999. Leaf anatomy, inclination, and gas exchange relationships in evergreen sclerophyllous and drought semideciduous shrub species. *Photosynthetica.* 37: 573-585.
- Horie, T. and T. Udagawa. 1971. Canopy photosynthesis of sunflower plants. Its measurements and modeling. *Bull. Nat. Inst. Agr. Sci., Ser. A.* 18: 1-56.
- 石川栄助. 1964. 実務家のための新統計学. p.46. 槇書店. 東京.
- Ivanov, N., P. Boissard, M. Chapron and P. Valeary. 1994. Estimation of the height and angles of orientation of the upper leaves in the maize canopy using stereovision. *Agronomie.* 14: 183-194.
- Kucharik, C. J., J. M. Norman and S. T. Gower. 1998. Measurements of leaf orientation, light distribution and sunlit leaf area in a boreal aspen forest. *Agric. Forest Meteorol.* 91: 127-148.
- 黒岩澄雄. 1990. 物質生産の生態学. 東京大学出版会. 東京.
- Monsi, M and T. Saeki. 1953. Über den Lightfactor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion. *Jap. J. Bot.* 15: 22-52.
- Mullen, J. L., C. Weinig and R. P. Hangarter. 2006. Shade avoidance and the regulation of leaf inclination in *Arabidopsis*. *Plant, Cell and Environment.* 29: 1099-1106.
- Shibayama, M. 2004. Seasonal profiles of polarized reflectance and leaf inclination distribution of wheat canopies. *Plant Prod. Sci.* 7: 397-405.
- Shibayama, M. 2006. Radiometric estimation of canopy leaf inclination angle of various crop species using multi-band polarization and reflectance. *Plant Prod. Sci.* 9: 156-160.
- Shibayama, M. and Y. Watanabe. 2007. Estimating the

- mean leaf inclination angle of wheat canopies using reflected polarized light. *Plant Prod. Sci.* 10: 329-342.
- 坪井八十二. 1974. 新編農業気象ハンドブック. p.780. 養賢堂. 東京.
- 宇田川武敏. 1980. 作物個体群の葉群構造とそのモデル化. *農技研報. D.* 31: 127-202.
- Utsugi, H., M. Araki, T. Kawasaki and M. Ishizuka. 2006. Vertical distributions of leaf area and inclination angle, and their relationship in a 46-year-old *Chamaecyparis obtusa* stand. *Forest Ecol. Manage.* 225: 104-112.
- Victor, L., H. G. Barradas, G. Jones and J. A. Clark. 1999. Leaf orientation and distribution in a *Phaseolus vulgaris* L. crop and their relation to light microclimate. *Int. J. Biometeorol.* 43: 64-70.
- Wang, W. M., Z. L. Li and H. B. Su. 2007. Comparison of leaf angle distribution functions: Effects on extinction coefficient and fraction of sunlit foliage. *Agric. Forest Meteorol.* 143: 106-122.
- Welles, I. J. and J. M. Norman. 1991. Instrument for indirect measurement of canopy architecture. *Agronomy J.* 83: 818-825.
- Wilson, J. and J. Warren. 1963. Estimation of foliage denseness and foliage angle by inclined point quadrats. *Aust. J. Bot.* 11: 95-105.
- 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: 89-116.
- 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: 101-108.
- 山本隆儀・上田仁悦・小泉弘樹・西沢滝太. 1990. 落葉果樹の樹冠内放射の減衰係数とその推定パラメータ. 山形大学紀要（農学）11: 155-176.
- 山本隆儀・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: 59-93.
- 山本 強. 1983. The 3 Dimensional Computer-Graphics. p.20-21. CQ出版. 東京.