

# 二つのシミュレーションモデルと純光合成速度推定式を用いたリンゴ園の光環境と光合成の動態に関する研究

山 本 隆 儀

山形大学名誉教授

(平成 25 年 11 月 13 日受理)

## Studies on Dynamic Changes of Light Environment and Photosynthesis in Apple Orchards Using Two Simulation Models and A Formula to Estimate Net Photosynthetic Rate

Takanori YAMAMOTO

Professor Emeritus, Yamagata University, Tsuruoka, 997-8555, Japan

(Received November 13, 2013)

---

山形大学紀要（農学）第17巻 第1号 別刷（平成26年）

Reprinted from Bulletin of Yamagata University

(*Agricultural Science*) Vol. 17 No.1 (2014)

---

## 二つのシミュレーションモデルと純光合成速度推定式を用いたリンゴ園の光環境と光合成の動態に関する研究

山 本 隆 儀

山形大学名誉教授  
(平成25年11月13日受理)

### Studies on Dynamic Changes of Light Environment and Photosynthesis in Apple Orchards Using Two Simulation Models and A Formula to Estimate Net Photosynthetic Rate

Takanori YAMAMOTO

Professor Emeritus, Yamagata University, Tsuruoka, 997-8555, Japan  
(Received November 13, 2013)

#### Summary

Apple 'Fuji' trees were constructed in a computer using canopy constructing and analyzing system (CACOAS). Each constructed tree was arrayed with a plant spacing, then light environment in each virtual orchard was analyzed by orchard light environment analyzing system (OLEAS). Data of leaf surface PPFD (leaf PPFD) from OLEAS and meteorological factors were used to a multiple regression formula for net photosynthetic rate (Pn) of 'Fuji' leaf, then Pn in orchard level (orchard Pn) were calculated. Distributions of leaf PPFD and Pn in tree canopies were very wide on a clear day, and narrow on an overcast day. Anyway were remarkably different from the normal distribution. By elaborating some contrivances in CACOAS, investigation of seasonal changes of tree canopies and their light environment became possible. As the result, a peak of the daily mean of orchard Pn appeared in the end of June. The summertime might be an important period for plant production though the light environment was not so good. Toward ten years of tree age, the daily mean leaf PPFD in orchard decreased rapidly and the daily mean of orchard Pn increased rapidly. Thereafter, these values showed some gentle changes. The effect of tree row direction on the mean leaf PPFD in orchard was very small. Mean leaf PPFD in orchard and the mean leaf Pn decreased on an approximate-logarithmic curve against LAI per orchard land area (orchard LAI) which was given by regulating quantity of leaves per tree without changing the plant distance. On the contrary, the mean orchard Pn increased like an approximate-power line against the orchard LAI. A switching point from rapid increases of the mean orchard Pn to the slow ones was found on the power line to be about 1 of the orchard LAI. This point was considered to be an optimum orchard LAI for plant production. When planting density was changed without altering occupied land area by a tree, it was found that the orchard Pn increased in proportion to the planting density though the light environment slightly deteriorated. Using the similar technique, light environment and orchard production of a designing dense planting were compared with a normal planting.

**Key words** : designing dense planting, orchard LAI, plant distance, tree age, tree row direction

#### 緒 言

果樹の樹冠内に光が浸透すれば葉層の光合成作用は増大し、果実肥大が進み、果実間の品質むらも無くなり、着色も良くなる。よって、樹冠内光環境の改善は高品質

多収果実の安定的生産にとって極めて重要である。特に光要求度の高いリンゴではこのことが見逃せない。このためかりんご葉の光合成 (Seeley, 1978 ; Lakso・Seeley, 1978) や樹冠内部の光環境 (Heinicke, 1969 ; Jackson,

1968) に関する研究報告は少なくない。樹高を高くし、あるいは葉量を減らせば、樹冠内は明るくなるが、これらは果実生産および栽培管理にとって好ましくない。葉量を確保したうえで、多年にわたり、全生育季節、晴天と曇天および終日を通して、果樹園全体の光環境と光合成作用を改善することが重要である。

ところが樹冠全体や果樹園全体の光環境や光合成作用の改善を目的にした研究は多くない (Charles-Edwards・Thorpe, 1976; Palmer, 1977; Jackson, 1980)。この背景には、投射光強度、太陽高度、太陽方位が大きく日変化する条件下、葉数が極めて多く、立体的な樹冠における光環境と光合成速度の実測定が困難であったことがあげられる。これに加え、周辺樹による光吸収の影響を含む果樹園全体の光環境と光合成の調査になると、このための実験材料が得にくいことがあげられる。同一仕立て方法でも樹冠形や葉量にはかなりの変異が現れ、正確な比較のための実験条件が成立しない。そこで、本研究では2種類の四次元シミュレーションモデルである果樹の樹形構築解析システム (CACOAS, 山本ら, 2004) と果樹園光環境解析システム (OLEAS, 山本, 1999) にリンゴ葉の純光合成速度の重回帰推定式 (山本ら, 1995, 以下、光合成推定式) を組み合わせることで上記の困難を解決しようとした。すなわち、CACOASにより様々な樹の構築、OLEASにより果樹園全体の光環境の解析および光合成推定式により園地レベルの純光合成速度の算出が可能になると考えた。

筆者は果樹の仕立て方法や樹冠形を工夫することにより果樹園光環境を改善できるものと考えている。いわゆる受光態勢の改善である。ところが、樹冠形、果樹園、光環境などはいずれも空間的な変異を有し、さらに時刻、季節、樹齢などの時間的な変化も加わる。これらの動態を踏まえたうえで、光環境や光合成作用に対する仕立て方法や樹冠形の違いの影響を調査あるいは比較することが肝要であると考えた。そこで、本報では果樹園における光環境と光合成の動態をまず明らかにしたうえで、今後の研究に必要な情報を入手しようとしたものである。

本報で取り上げる動態研究の柱を列举すると、以下の通りである。CACOASを用いてリンゴ‘ふじ’の5種類の仕立て方法における幾つかの樹を構築した。そして、それぞれを配植した仮想果樹園を対象にいずれも晴天と曇天のもとで以下の7種類のシミュレーション実験を行った。1) 樹冠内全葉における葉面の光合成有効光量子束

密度 (以下、葉面PPFD) と純光合成速度 (以下、Pn) の毎時分布および1日における分布のプロフィール、2) 樹冠内全葉における葉面PPFDとPnの毎時平均値の経時的変化、3) 樹冠内全葉における葉面PPFDとPnの平均値および園地当たりの純光合成速度 (以下、園地純光合成速度) の季節的な変化、4) 上記3者の経年的変化、5) 樹列方向の違いが葉面PPFDに及ぼす影響、6) 栽植距離を固定したうえでの着生葉量 (したがって園地当たり葉面積指数) の違いが上記3者に及ぼす影響、および7) 着生葉量と割り当て土地区画を固定したうえでの栽植密度の違いが上記3者に及ぼす影響であった。加えて計画的密植栽培における果樹園の光環境と光合成の動態についても検討した。

## 材料および方法

### 1. CACOASによる供試樹の構築

CACOASの詳細については既報 (山本ら, 2004) を参照されたいが、これは長文であったため、ここでは、その最小限の解説、使用パラメータおよび本実験における運用条件などについて記す。CACOASは指定された骨格枝の配置に基づき、毎年、枝と葉を空間配置しながら、コンピュータ上に樹を構築した。このとき、品種特有の枝肥大量、新梢の分岐角度と発生位置、新梢の伸長量、葉の着生位置などを推定した。その推定方法は、親枝の諸形質と子枝の発生順番などを説明変数とする重回帰推定法とあらかじめ観測して得られた枝形質の分布形に乱数を組み合わせたモンテカルロシミュレーション法であった。

放任樹とは異なり、CACOASは南北樹幅制限 (LSNW)、東西樹幅制限 (LEWW) および樹高制限 (LTH) からなる割り当て空間 (set space) 内に樹を構築した (第1図)。本研究では樹高制限を3.5mとした。割り当て土地区画のサイズ (南北樹幅制限×東西樹幅制限) は仕立て方法により異なった。開心形仕立て (OC)、変則主幹形仕立て (MCL) およびY字形仕立て (YS) の3者では4m×4mおよび細形主幹形仕立て (SCL) では3m×3mとした。トレリス誘引仕立て (TT) では南北樹列の場合4m×2m、東西樹列の場合2m×4mとした。このときのトレリスは垂直棚であった。なお、上記割り当て空間や割り当て土地区画のサイズは本報特有なもので、実際には様々なものがあることを断っておきたい。

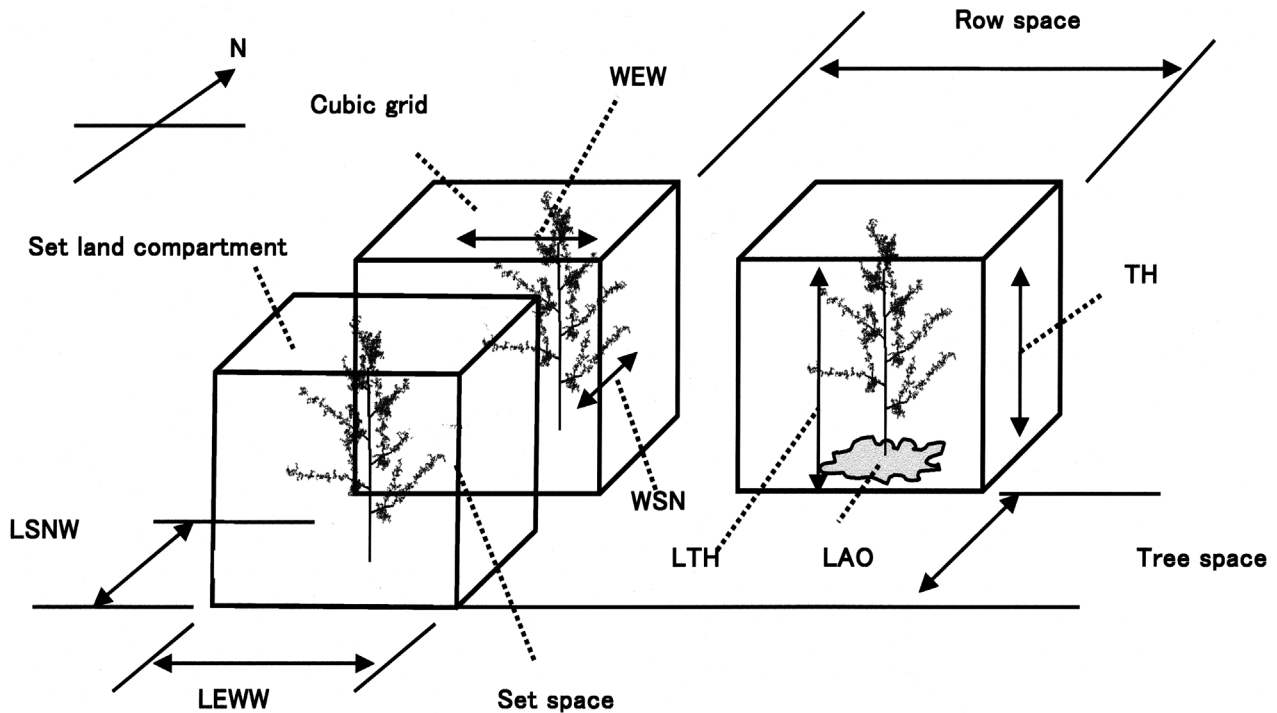


Fig.1 Limit of south-north tree width (LSNW), limit of east-west tree width (LEWW), tree width in south-north (WSN), tree width in east-west (WEW), limit of tree height (LTH), trees height (TH), set space, set land compartment, cubic grid, tree space, row space and land area occupied by a crown (LAO).

CACOASは、整枝剪定の際の選択枝（以下、整枝剪定パラメータ、第1表）に基づき、間引き剪定や切り返し剪定を実施した。また、上記の割り当て空間をはみ出したときには、太枝落としも含めた整枝剪定を自動的に行った。さらにCACOASは2段階の葉量自動調節機能（粗調節機能と微調節機能）を用いながら（山本ら、2004）、割り当て土地区画面積当たりの葉面積指数（以下、LAIa）をその年次目標値に完全に一致させた。

受光態勢の改善に向けた仕立て方法や樹冠形状の検索試験と異なり、本研究目的が動態調査であったことから、本報で用いた樹数は限られた。動態調査やプロフィール調査には各仕立て方法1樹（第1表のOC-1、MCL-1、YS-1、SCL-1およびTT-1）、樹列方向比較実験に限り各仕立て方法5樹（第1表のOC-1~OC-5、MCL-1~MCL-5、YS-1~YS-5、SCL-1~SCL-5およびTT-1~TT-5）を用いた（第1表）。整枝剪定パラメータには主幹の長さ、主枝（PSB）数、第1主枝の発生方角、第1主枝の主幹上の位置、第1主枝の立ち上がり勾配（build-up gradient of PSB）、主枝における枝序の開度（phase of rotation angle of PSB）、主枝の発生間隔の分布、主枝長分布、主枝の分岐角度分布、主枝当たりの垂主枝（SSB）

数、第1垂主枝の発生位置、垂主枝における枝序の開度（rotation angle of the first SSB from earth axis）、垂主枝の発生間隔の分布、垂主枝長分布、新梢間引きにおける傾斜角度限界、新梢間引きにおける分岐角度限界および新梢間引きにおける本数間隔が含まれた（第1表）。リンゴ‘ふじ’における枝葉の量的形質の重回帰推定法とモンテカルロシミュレーション法に必要なパラメータ類は既報（山本ら、2004；山本ら、2007）に準じた。

CACOASは、構築した樹全体を1辺が21分割された三次元仮想グリッドで覆い、樹冠に関する様々な解析を行い、数多くの樹冠形状値を出力した（山本ら、2004）。その際、グリッド内部のブロック（立方体）の容積、その底面の面積および1辺の長さを単位として、それぞれ、容積、面積および長さに関連した樹冠形状値を算出した（山本・山口、1989；山本ら、2004）。CACOASからは、各年の整枝剪定処理に関する履歴、割り当て空間への抵触とそれへの対処記録などの樹形構築過程の記録とともに、グリッド内各ブロックにおける葉数の分布データを毎年出力した（山本ら、2004）。これは3次元配列変数の形を有し、OLEASへの入力データとして用いられた（以下、葉数分布データ）。

Table 1 Constitutions of skeleton branches and several parameters for training and pruning of the five training systems; open center (OP), modified central leader (MCL), Y shape (YS), slender central leader (SCL) and training to trellis (TT). The abbreviations in the Table were as follows; PSB: primary scaffold branch, EQ: equal, BL: bottom longer, EL: equal length, EA: equal angle, BW: bottom wider, ST: steep, GE: gentle, SSB: secondary scaffold branch.

Parameters (units)	Constructed trees							
Length of trunk (cm)	5-LL	4-LL	3-LL	2-LL	1-LL	5-TOS	4-TOS	3-TOS
Number of PSBs	250	250	250	250	250	240	240	240
Direction of the first PSB	7	7	7	7	7	13	13	13
Height of the first PSB (cm)	S	S	S	S	S	SE	SE	SE
Phase of rotation angle of PSB (degree)	180	180	180	180	180	144	144	144
Distribution pattern of bearing interval of PSB	EQ	EQ	EQ	EQ	EQ	EQ	EQ	EQ
Distribution pattern of PSB length	BL	BL	BL	BL	BL	EL	EL	EL
Branching angle distribution pattern of PSB	BW	EA	EA	EA	EA	BW	EA	EA
Build-up gradient of PSB	GE	GE	GE	GE	GE	GE	GE	GE
Number of SSBs per PSB	2	2	2	2	2	1	1	1
Rotation angle of first SSB from earth axis (degree)	0	0	0	0	0	90	90	90
Distance from the base of first SSB (cm)	15	15	15	15	15	10	10	10
Distribution pattern of bearing interval of SSB	EQ	EQ	EQ	EQ	EQ	EQ	EQ	EQ
Distribution pattern of SSB length	EL	EL	EL	EL	EL	EL	EL	EL
Limitative branching angle of vegetative shoot in thinning (degree)	40	40	40	40	40	40	40	40
Limitative inclination angle of vegetative shoot in thinning (degree)	70	70	70	70	70	70	70	70
Interval of shoot thinning (shoot)	2	2	2	2	2	2	2	2

<sup>2</sup>Eight directions.

## 2. OLEASによる光環境の解析

OLEASの詳細については既報（山本, 1999）を参照されたい。ここではその最小限の解説と本実験に用いたパラメータ、データ、実験設定などについて記す。OLEASは周辺樹による光吸収などを計算しながら対象樹の光環境を解析した。その際、樹間距離や樹列間距離にアナログ値を用いることができず、ブロック1辺長を単位とする樹間ブロック数および樹列間ブロック数を用いた（山本, 1999）。これはOLEASの解析計算原理に起因するものであった。本研究では、5種類の仕立て方法のうち、南北樹幅制限と東西樹幅制限がともに4mであった開心形仕立て（OC）、変則主幹形仕立て（MCL）およびY字形仕立て（YS）では、立方体グリッド1辺長を4mとし、栽植距離を変える実験以外は樹間ブロック数を21、樹列間ブロック数を31とした（ブロック1辺長は19.05cm）。この樹列間距離は並木植えの栽培管理に必要な作業空間（割り当て区画の樹列に沿った外側に幅1m以上の作業道）を確保するための長さであった。この場合の園地当たり葉面積指数（以下、園地LAIまたはLAIo）は、先述の割り当て区画面積当たり葉面積指数（LAIa）の0.6774倍になった。南北樹幅制限と東西樹幅制限がともに3mであった細形主幹形仕立て（SCL）では、樹高制限が3.5mであったことから、立方体グリッド1辺長は3.5m、ブロック1辺長は16.67cmになった。上記3仕立て方法の園地LAIに最も近づけ、かつ、作業道を確保するためには、樹間ブロック数は18、樹列間ブロック数は27になった。このときの園地LAIは0.6667×LAIaで、上記3仕立て方法の98.41%に減少した。トレリス誘引仕立て（TT）の場合、東西樹幅制限が2m、南北樹幅制限が4mであり、立方体グリッド1辺長は4m、ブロック1辺長は19.05cmになった。上記3仕立て方法の園地LAIに最も近づけ、かつ、作業道を確保するためには、隣接樹の立方体グリッドを対象樹の立方体グリッド内に一部重ねることが必要であった。よって、樹間ブロック数は21、樹列間ブロック数は16になり、園地LAIは0.6562×LAIaに等しく、



上記3仕立て方法の96.88%に減少した。このため、細形主幹形仕立て（MCL）とトレリス誘引仕立て（TT）の場合、他の3仕立て方法の園地LAIに全く等しくできず、それぞれ、約1.59%および約3.12%小さい設定となったことを断っておく。

OLEASのプログラム計算に必要なパラメータ、たとえば、数値積分の分割数などは既報に掲載したものをそのまま用いたが（山本, 1988; 山本, 1990; 山本, 1999）、散乱光減衰係数の推定パラメータについては上記文献のものとは異なり、最近、その推定精度を向上させたもの（山本・奥山, 2004）を用いた。また、‘ふじ’の個葉面積は、山本・畠（1991）の推定式を用いて算出した。

第2表にOLEASに用いた晴天日および曇天日の6時から18時までの投射光データを示した。このデータには天空からの全投射光の水平面PPFD（total light）および太陽光線を遮って測定した天空からの投射光の水平面PPFD（sky light）が含まれた。これらは5月中旬、6月上旬、6月下旬、7月下旬、8月下旬、9月下旬および10月下旬の鶴岡市における典型的な晴天日と曇天日に計測した（山本, 1988）データをもとに、午前と午後が対称的になるように修正したものであった。とはいえ、10月下旬の18時は日没後であったので投射光データは無い。そのうえ、時期によっては日の出時刻が6時以前、あるいは日没時刻が18時以後になったので、この時間帯の計算については除外したことを断わっておく。OLEASに用いた太陽赤緯には、それぞれ、5月15日、6月1日、6月22日、7月22日、8月22日、9月22日および10月22日の該当数値を用いた。

OLEASは、指定された時刻ごと、樹冠内における葉面PPFD（単位は $\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ）のデータを全葉分について出力した。このデータをもとに、毎時の葉面PPFD階級別頻度分布および1日としての葉面PPFD階級別頻度分布を算出できた。これらの数値を平均した毎時平均葉面PPFDおよび日平均葉面PPFDには、略号として、それぞれ、HMPPFDとDMPPFDを当てた。必要ならば、前者には時刻を付した（たとえば、12時ならば12HMPPFD）。また、晴天（clear day）と曇天（overcast day）に分けて表示するときには、それぞれ、頭文字CとOを付け、CDMPPFD、ODMPPFD、C12HMPPFD、O9HMPPFDのように表現した。本報では、OLEASからの出力データを引用する場合、主に上記の平均値を用いた。

### 3. 純光合成速度の推定方法

リンゴ‘ふじ’葉の純光合成速度（ $P_n$ ）の重回帰推定式（1式、山本ら, 1995）を用いて、OLEASが出力した各葉の葉面PPFD（ただし、1式における単位は $\text{mE} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ）、推定日の展葉後日数（単位d）、日本時間における推定時刻と正午との時間差（単位min）、土壤水分張力（単位MPa）、推定時刻の大気水蒸気圧不足量（以下、VPD、単位は $10^4\text{Pa}$ ）および推定時刻の気温（単位 $^{\circ}\text{C}$ ）を説明変数とし、着生葉の $P_n$ （単位 $\text{mgCO}_2 \cdot \text{dm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ）を計算した。

$$\begin{aligned} P_n = & 0.6129 \times \text{展葉後日数} - 0.005976 \times \text{展葉後日数}^2 + \\ & 0.0000167 \times \text{展葉後日数}^3 + 0.2508 \times \text{気温} - 0.8602 \\ & \times \text{PPFD}^3 + 17.43 \times \text{PPFD}^{0.5} + 0.0000003187 \times \\ & \text{土壤水分張力}^3 - 0.01151 \times \text{正午との時間差} - 73.57 \times \\ & \text{VPD} - 14.23 \end{aligned} \quad (1)$$

なお、重相関係数は0.8177、決定係数は66.86%、残差標準偏差は4.026、F値は54.92（ $P < 0.01$ ）であった（山本ら, 1995）。

1式に用いた説明変数の入手方法は以下の通りであった。葉面PPFDはOLEASからの出力値（単位 $\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ）を千倍し、推定時期の展葉後日数は‘ふじ’の展葉開始日（4月15日）より算出し、推定時刻の正午との時間差はOLEASの推定時刻（6時から18時までの13時刻）より算出した。土壤水分張力については土壤水分が潤沢に維持されていると見なして、0.01MPaの値を常時用いた。鶴岡気象観測所のアメダスデータのうち2.に記した5月から10月までの7時期に限り典型的な晴天日と曇天日における毎時の気温と相対湿度（第2表）を用いてVPDを算出した。

現行のOLEASには純光合成速度を推定する機能が具備されてなかった（山本, 1999）、以下の2種類の自動計算機能を付与した。1つは、推定時期、推定時刻および天候に対応した気温と相対湿度のデータ読み取り、これらを用いたVPD値の算出、展葉後日数および正午との時間差などの計算機能であった。他の一つは、個々の葉面PPFD計算直後における $P_n$ の重回帰推定、この $P_n$ データを用いた毎時の $P_n$ 階級別頻度分布、1日を通じた $P_n$ 階級別頻度分布およびこれら平均値の計算処理であった。なお、得られた毎時平均 $P_n$ と日平均 $P_n$ の略号には、それぞれ、HMPNとDMPNを当てた。

上記のHMPN（単位 $\text{mgCO}_2 \cdot \text{dm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ）とDMPN（単位 $\text{mgCO}_2 \cdot \text{dm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ）は単位葉面積当たり単位時

Table 2 Meteorological data at the thirteen hours on typical clear days and overcast ones of the seven periods at Tsuruoka City.

Middle of May (clear day)					Middle of May (overcast day)				Beginning of June (clear day)				Beginning of June (overcast day)			
Hours	Total light <sup>z</sup>	Sky light	Temp. <sup>y</sup>	RH <sup>x</sup>	Sky light	Temp.	RH		Total light	Sky light	Temp.	RH	Sky light	Temp.	RH	
6	228	178	12.3	77	155	9.3	82		194	155	15.7	83	220	13.3	78	
7	537	303	14.2	64	370	11.6	75		588	317	18.1	74	374	14.0	72	
8	793	360	15.7	54	543	14.6	67		831	367	20.4	64	557	15.5	64	
9	1140	413	18.1	45	640	16.9	61		1172	417	22.1	59	625	16.6	66	
10	1563	459	18.5	41	772	19.0	50		1578	460	22.3	54	753	18.3	64	
11	1926	489	18.5	35	772	19.5	47		1945	491	22.4	48	791	20.2	61	
12	2088	501	18.0	33	829	19.2	42		2088	501	22.3	57	762	21.6	54	
13	1926	489	18.0	33	772	19.9	50		1945	491	22.3	56	791	21.7	54	
14	1563	459	17.2	31	772	19.5	54		1578	460	22.3	61	753	22.0	54	
15	1140	413	17.5	32	640	18.3	55		1172	417	22.0	65	625	21.8	56	
16	793	360	17.1	38	543	17.7	49		831	367	22.6	54	557	21.2	58	
17	537	303	16.3	44	370	16.9	46		588	317	21.6	61	374	20.2	61	
18	228	178	15.6	40	155	16.6	63		194	155	20.4	65	220	18.6	62	
End of June (clear day)					End of June (overcast day)				End of July (clear day)				End of July (overcast day)			
Hours	Total light	Sky light	Temp.	RH	Sky light	Temp.	RH		Total light	Sky light	Temp.	RH	Sky light	Temp.	RH	
6	300	218	17.8	79	228	17.8	97		166	125	25.0	81	80	23.6	95	
7	548	307	20.1	62	345	17.7	98		399	257	26.7	72	274	24.0	92	
8	795	361	22.3	56	538	17.9	97		701	346	28.0	70	270	25.7	82	
9	1113	410	24.8	42	637	18.1	94		1012	417	29.3	58	365	26.0	78	
10	1493	452	25.3	59	753	17.5	96		1405	463	30.8	54	445	27.4	70	
11	1856	484	25.4	56	820	17.8	96		1802	468	31.8	59	650	29.0	61	
12	2018	496	25.4	59	829	18.1	93		1941	447	32.3	58	725	29.4	57	
13	1856	484	25.3	59	820	18.5	91		1802	468	31.6	54	650	29.1	56	
14	1493	452	24.8	63	753	18.0	96		1405	463	31.6	49	445	29.3	56	
15	1113	410	25.0	59	637	17.7	90		1012	417	31.1	54	365	29.0	57	
16	795	361	24.7	64	538	17.7	94		701	346	30.4	53	270	28.4	61	
17	548	307	24.9	59	345	17.6	91		399	257	29.8	54	274	27.4	62	
18	300	218	24.6	60	228	17.3	91		166	125	29.6	57	80	26.1	62	
End of August (clear day)					End of August (overcast day)				End of September (clear day)				End of September (overcast day)			
Hours	Total light	Sky light	Temp.	RH	Sky light	Temp.	RH		Total light	Sky light	Temp.	RH	Sky light	Temp.	RH	
6	150	117	19.1	88	78	16.8	90		70	6	10.8	90	6	15.9	97	
7	384	255	20.6	84	320	18.5	85		293	215	13.4	83	84	16.5	94	
8	718	346	22.9	71	543	21.0	77		562	310	15.6	75	295	18.1	89	
9	1008	395	24.5	64	663	23.3	73		799	361	18.6	64	326	18.9	84	
10	1369	440	26.2	59	714	24.6	62		1071	404	20.0	51	368	19.7	82	
11	1652	467	26.2	58	851	25.4	63		1310	433	22.3	40	450	20.5	79	
12	1766	477	26.6	57	891	26.8	61		1413	444	23.6	36	695	21.9	73	
13	1652	467	27.2	55	851	28.1	55		1310	433	24.3	32	450	22.1	76	
14	1369	440	27.4	52	714	28.0	56		1071	404	22.5	51	368	21.5	76	
15	1008	395	27.4	55	663	27.5	60		799	361	23.3	51	326	22.4	73	
16	718	346	27.2	57	543	27.0	61		562	310	23.7	42	295	22.0	73	
17	384	255	26.5	61	320	25.9	65		293	215	21.8	48	84	20.9	78	
18	150	117	25.7	66	78	24.7	67		70	6	19.9	56	6	19.8	83	
End of October (clear day)					End of October (overcast day)											
Hours	Total light	Sky light	Temp.	RH	Sky light	Temp.	RH									
6	2	0	8.4	89	0	9.4	91									
7	115	79	9.7	85	29	10.0	88									
8	392	258	11.8	81	194	11.6	83									
9	644	330	14.3	69	333	13.6	76									
10	630	327	15.9	55	518	15.4	66									
11	1031	399	16.6	52	644	17.5	48									
12	1117	410	16.5	51	646	18.6	44									
13	1031	399	16.4	50	644	18.7	45									
14	630	327	16.3	51	518	18.8	48									
15	644	330	16.2	53	333	18.7	53									
16	392	258	15.5	56	194	18.6	59									
17	115	79	14.9	58	29	16.3	63									
18	No data <sup>w</sup>	No data	14.2	61	No data	15.8	64									

<sup>z</sup>Photosynthetic photon flux density at horizontal plane ( $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )<sup>y</sup>Air temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )<sup>x</sup>Relative humidity (%).<sup>w</sup>After the sunset.

間の純光合成速度であった。これらと異なり、園地当たりの純光合成速度は栽植距離によって大きく変わる。園地面積当たりの毎時平均純光合成速度（HMPNO, 単位  $\text{gCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ）と園地面積当たりの日平均純光合成速度（DMPNO, 単位  $\text{gCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ）を以下の方法で計算した。割り当て土地区画面積、割り当て土地区画面積当たり葉面積指数（LAIa）および栽植距離（樹間距離と樹列間距離）を2式に代入することで園地LAI（LAIo）をまず求めた、次に、3式および4式を用いてそれぞれHMPNO およびDMPNO を算出した。

$$\text{LAIo} = \text{LAIa} \times \text{割り当て土地区画面積} / (\text{樹間距離} \times \text{樹列間距離}) \quad (2)$$

$$\text{HMPNO} = \text{HMPN} \times \text{LAIo} / 10 \quad (3)$$

$$\text{DMPNO} = \text{DMPN} \times \text{LAIo} / 10 \quad (4)$$

#### 4. 各シミュレーション実験における供試樹とその構築方法および光環境と光合成の調査方法

緒言の末尾に記した幾つかの動態調査項目におけるシミュレーション実験の基本的手法は上記1～3に準じた。とはいえ、調査項目は多岐にわたり、このために必要な樹の構築と光環境の解析にはCACOASとOLEASの使用法に一定の工夫を凝らす必要があった。各シミュレーション実験における供試樹、設定条件（樹齢、時期、栽植距離など）、CACOASとOLEASの使用法の工夫などは以下の通りであった。

##### 1) 樹冠内全葉における葉面PPFDとPnの分布形および毎時平均値の経時変化

各仕立て方法1樹（第1表）の樹齢15年におけるCACOASからの葉数分布データを2.に記した栽植距離および南北樹列の条件でOLEASに入力し、7月下旬の晴天日と曇天日、樹冠内全葉における葉面PPFDとPnの分布および毎時平均値の経時変化を調査し、これらのプロフィールを調査した。

##### 2) 樹冠内全葉における葉面PPFDとPnの平均値および園地当たり純光合成速度の季節変化

葉量がまだプラトー（横ばい状態）に到達していない春から初夏にかけての期間は、新梢長、着葉数および個葉面積が急速に増大する期間に当たるため、光環境や純光合成速度などに大きな季節変化が予想された。葉の重さにより新梢自身が下垂することは考えられない。また、真夏のリンゴ果実はまだ小さく、この時期、果実の重さで枝が下垂することも考えられなかった。けれども、

収穫期には、3年生枝などは明らかに下垂し、枝下垂による光環境の変化も予想された。

現行のCACOASは、上記の季節的変化に対応した計算機能を元々備えておらず、その上、この機能を持つべくCACOASを作り替えることは以下の理由から困難であった。すなわち、現行のCACOASは樹齢ごと1回限りの樹形、樹冠形、葉数分布データ、樹冠形状値などを出力した。つまり、そこで用いられた種々のパラメータは葉量がプラトーに到達した時期（夏）のものに限定され、新梢も伸びきった状態のもの、個葉面積も最大値が用いられた。これに加え、現行のCACOASは膨大な量の枝情報を年々記憶蓄積しながら、これらを用いて新たに枝を構築したため、いったん発生した枝に関する枝情報を後で変更できない。そこで、現行CACOASの機能を温存したまま、季節的変化の調査が必要な樹齢（推定樹齢）に限り以下の2種類の工夫により、季節の推移に伴って変化する葉数分布データを入手した。

葉量が急増する5月中旬、6月上旬および6月下旬の3つの時期（新梢伸長期）に限定し、以下の工夫を施した。樹齢1年目から現行のCACOASによるシミュレーションをそのまま実行しながら、推定樹齢に限り、新梢長（最終長）を推定した直後に、この最終長に対する各時期における新梢長の割合を推定し、これを最終長に乗じたものを新梢長とし、葉を着生させた。これを全ての新梢で繰り返し、その時期としての葉数分布データを入手し、該当する時期の個葉面積とともにOLEASに入力した。最終新梢長に対する各時期の新梢長の割合と各時期の個葉面積を推定するためのパラメータは既報（山本・畠, 1991）に準じた。

枝下垂が顕著になる9月下旬と10月下旬に限定し、推定樹齢の3年前までは、現行のCACOASによるシミュレーションをそのまま実行し、推定樹齢の2年前に限り、発生する全ての新梢に後述の下垂処理を施し、下垂状態の新梢のまま翌年以降に引渡した。この場合でもCACOASによる剪定処理は通常通り実施した。そして、下垂処理を施した新梢が3年生枝になった年（推定樹齢の年）の新梢から葉数分布データを入手した。この操作により、下垂した3年生枝上に着生した全ての枝の姿勢が変化した。推定樹齢における前年生枝（2年生枝）はその母枝（3年生枝）の下垂により既に（前年に）姿勢変化が生じた。新梢はその母枝（2年生枝）に発生したので、連動してその姿勢も変化した。リンゴの短枝（新



梢）は先端に花芽を形成し、翌年に短果枝（2年生枝）として開花結実するので、2年生枝の一部であった短果枝自身も新たに下垂する。だが、短果枝はごく短いので短果枝葉の空間位置の変化は僅かであり、葉数分布データにはほとんど影響しない。よって、短果枝独自の下垂処理については省略したことを断わっておく。また、4年生枝以上の枝は強固なためほとんど下垂しないものと見なした。

果実重による3年生枝の傾斜角度変化量は既報（山本・畠, 1991）を参考にした。‘ふじ’の場合、落葉後の3年生枝の傾斜角度（水平面への交差角度）に対して果実が着生した収穫期（10月下旬）におけるそれは、上向枝では平均5.1度減少し、下向枝では平均5.1度増大した（山本・畠, 1991）。9月下旬の傾斜角度変化量はこの半分と見なした。CACOAS内で枝の下垂処理を自動的に施すため、以下のアルゴリズムを用いた。すなわち、CACOASにより通常通り新梢を発生させ、その7点座標（曲った新梢を折れ線で表示したときの7点座標）が確定した段階で、新梢基部の点と残り6点を結ぶ各直線の方程式（空間内の直線方程式）を求めた。さらに、各直線を新梢基部の点を固定したまま傾斜角度変化量だけ垂直方向に回転したときの6点の空間座標を算出し、これらを下垂処理後の空間座標とした。上記計算処理は9月下旬の下垂と10月下旬の下垂に分けて行い、それぞれの葉数分布データを入手した。

各仕立て方法1樹（第1表）の樹齢15年において、5月中旬（5月15日）、6月上旬（6月1日）、6月下旬（6月22日）、7月下旬（7月22日）、8月下旬（8月22日）、9月下旬（9月22日）および10月下旬（10月22日）の合計7期に分け、それぞれの時期に対応した上記工夫を施したCACOASによるシミュレーション実験を行った。そしてCACOASからの葉数分布データを2.に記した栽植距離および南北樹列の条件でOLEASに入力し、各時期の晴天日と曇天日、樹冠内全葉における葉面PPFDとPnの毎時平均値と日平均値の季節的变化および園地当たり純光合成速度の季節的变化を調査した。ただし、7月下旬と8月下旬の葉数分布データは現行のCACOASを実行したときのデータをそのまま用いた。

### 3) 樹冠内全葉における葉面PPFDとPnの平均値および園地当たり純光合成速度の経年的変化

CACOASを用いて、各仕立て方法1樹（第1表）の樹齢1年から20年までの葉数分布データを入手した。これ

らを2.に記した栽植距離および南北樹列の条件でOLEASに入力し、7月下旬の晴天日と曇天日、樹冠内全葉における葉面PPFDとPnの日平均値および園地当たり純光合成速度の経年的変化を調査した。

次に、計画的密植栽培法の効果（葉師寺, 1970）を光環境と光合成の方面から検証するため、以下の実験を行った。上記の樹を用いて永久樹列を作った。さらに、永久樹と同じ樹から成る間伐予定樹の樹列を永久樹列の真ん中に置き、上記同様なシミュレーション実験を行った。ところで、OLEASは割り当て空間内に侵入する隣接樹の枝葉を光環境の解析要素に用いないので、この場合、永久樹の割り当て空間内に侵入した間伐予定樹の枝葉による光減衰は無視された。いわば、侵入した枝葉が縮伐された格好になった。したがって、この場合のシミュレーション実験に限り、光環境が幾分過大評価されたことを断っておく。

### 4) 樹列方向の違いが樹冠内全葉における葉面PPFD平均値に及ぼす影響

各仕立て方法5樹（第1表）を構築し、樹齢15年におけるCACOASからの葉数分布データを2.に記した栽植距離を用い、OLEASに入力した。この場合、樹列方向が南北方向および東西方向の2通りを指定して、7月下旬の晴天日と曇天日、樹冠内全葉における葉面PPFDに対する樹列方向の違いの影響を調査した。トレリス誘引仕立て（TT-1～TT-5）の場合、割り当て土地区画の南北幅と東西幅が異なったので、以下の実験設定になった。すなわち、樹列方向が南北方向のときはその南北幅を4m、東西幅を2mとし、樹列方向が東西方向のときは南北幅を2m、東西幅を4mとし、あらかじめCACOASを用いて2種類の樹を構築したうえで、それぞれからの葉数分布データをOLEASに入力した。

### 5) 栽植距離を固定したうえでの樹着生葉量（したがって園地LAI）の違いが果樹園の光環境と光合成に及ぼす影響

5つの仕立て方法各1樹（第1表）の樹齢15年における葉数分布データを元データとした。この元データの3次元配列変数（ブロック内葉数）に係数を一律乗じ、樹着生葉量を変えた。この場合、約50段階の係数を用いて、幅広い樹着生葉量をもつ葉数分布データ（約50組）を作成した。次に、その各々を2.に記した栽植距離および南北樹列の条件でOLEASに入力し、7月下旬の晴天日と曇天日、樹冠内全葉における葉面PPFDとPnの平均値およ

び園地当たり純光合成速度を算出し、これらに及ぼす樹着生葉量（したがって園地LAI）の影響を調査した。この場合の園地LAIは3. に記した方法で算出した園地LAIに上述の係数を乗じて算出した。なお、小さい係数によってはブロック内葉数が1枚以下になり、その際、四捨五入したので、一部の葉ブロックが消え、樹冠が部分的に変形したことを断っておく。

#### 6) 樹着生葉量と割り当て土地区画を固定したときの栽植密度の違いが果樹園の光環境と光合成に及ぼす影響

5つの仕立て方法各1樹（第1表）の樹齢15年におけるCACOASからの葉数分布データを数十段階の栽植密度と組み合わせ、OLEASに入力し、7月下旬の晴天日と曇天日、樹冠内全葉における葉面PPFDとPnの平均値および園地当たり純光合成速度に及ぼす栽植密度の影響を調査した。本実験は正方形植えと並木植え（長方形植えとも言う）に分けて行った。正方形植えの場合、割り当て土地区画どうしが密接した状態から出発し、南北方向および東西方向に、それぞれ、ブロック1辺長ずつ樹間距離を増やすことで栽植密度を設定した。並木植えの場合、樹列は南北方向とし、2. に記した樹間距離は変えず、割り当て土地区画どうしが密接した状態から出発し、東西方向のみブロック1辺長ずつ樹列間距離を増やすことで栽植密度を設定した。

## 結 果

### 1. 樹冠内全葉における葉面PPFDとPnの分布形、毎時平均値の経時的変化および葉面PPFDとPnの関係

OC-1 樹の樹齢15年に限定し、7月下旬の晴天日と曇天日、樹冠内全葉における葉面PPFDとPnの毎時分布の一部を第2図および第3図に示した。晴天日の葉面PPFDの毎時分布は極めて広く分布し、その分布形は正規分布からは大きくかけ離れた（第2図左）。この広い分布の形成は、ちなみに葉面積指数1に相当する‘ふじ’葉層を直射光が透過したとき、透過光強度は約100分の1に減少したこと（山本・奥山, 2004）、および、直射光が葉面に垂直に当たったときの受光強度は時刻によっては直射光水平面強度の数倍になったことによる。曇天日の毎時分布は、天空散乱光のみの投射のため葉面PPFD分布は狭くなった。また、樹冠内部の重なった葉層は上記と同じ理由から非常に暗くなり、この部分の葉量が多かったため、曇天日でも正規分布とはかなり異なっ

た（第2図右）。晴天日におけるPnの毎時分布も極めて広く分布し、その分布形は正規分布から大きくかけ離れた（第3図左）。しかも、葉面PPFDの分布形とも異なった。曇天日のPnの毎時分布は、晴天に比べ幾分狭く、かつ、その分布形は正規分布からは大きくかけ離れた（第3図右）。他の時刻および他の樹における毎時分布にも上記に似たプロファイルが認められた（データ略）。

上記の毎時分布データから、全葉における葉面PPFDとPnの1日を通しての頻度分布をそれぞれ第4図および第5図に示した。晴天の1日を通しての葉面PPFD分布は曇天に比べて著しく広く、また、正規分布とは大きくかけ離れていた（第4図左）。晴天日1日を通して、葉面PPFDが $180 \mu E \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 以下の弱光を受ける頻度は約50%にも達した（第4図左）。曇天日1日を通して葉面PPFDが $135 \mu E \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 以下の弱光を受ける頻度は約50%にも達した（第4図右）。Pnの1日を通しての頻度分布形は葉面PPFDのそれとは大きく異なった。晴天日1日を通してPnが $9 mgCO_2 \cdot dm^{-2}h^{-1}$ 以下に留まった頻度は約50%にも達した（第5図左）。曇天日の場合、1日を通してPnは $4 \sim 10 mgCO_2 \cdot dm^{-2}h^{-1}$ の範囲に高原状に分布し、 $15 mgCO_2 \cdot dm^{-2}h^{-1}$ 以上では急減した（第5図右）。他の樹における1日を通しての頻度分布形にも上記に似たプロファイルが認められた（データ略）。

先述の毎時分布データから、これらの毎時平均値（HMPPFDとHMPN）を算出し、その経時的変化を第6図に示した。投射光データが正午を挟んで午前と午後が対称的であったため（第2表）、HMPPFDも正午を挟んで午前と午後がほぼ対称的な経時的変化を示した（第6図左）。HMPNの経時的変化（第6図右）は、Pn重回帰推定式の説明変数（1式）であった葉面PPFDの経時の変化の影響を強く受けた。しかし、これ以外の説明変数の気温やVPDが正午を挟んで午前と午後が非対称であったこと（第2表）から、HMPNは午前と午後が非対称的な経時的変化を示した（第6図右）。加えて、朝方の光合成作用が夕方より盛んであったことが読み取れた。

上記のOC-1 樹からのデータを用いて、樹冠内約1万枚の葉について、時刻ごとの葉面PPFDとPnの関係を第7図に示した。晴天日の場合、正午に近づくにつれ光飽和曲線状になり、正午付近には葉面PPFD値の増大に伴い、Pnの減少が認められた（第7図）。ただし、曇天日の正午においては上記の減少は認められなかった（第7図最下段右側部分）。

## 2. 樹冠内全葉における葉面PPFDとPnの平均値および園地当たり純光合成速度の季節的变化

第8図にY字形1樹（YS-1）の樹齢15年5月中旬、6月上旬、6月下旬、7月下旬、9月下旬および10月下旬の樹冠形図と樹形図を示した。Y字形を例示したのは樹冠形と樹形の季節的变化が読み取り易かったためである。この図から葉量および枝の長さや姿勢の季節的变化が読み取られ、材料および方法の4.2)に記したCACOASの工夫によるシミュレーションが意図した通りに行われたことを確認できた（第8図）。ただし、果実荷重による枝の下垂は、樹形を見る限りさほど顕著でなく、実際のリング園で見られる下垂樹ほどではなかった。本実験と異なり、後者は剪定や誘引などの人為的下垂処理によるためである。なお、8月下旬の樹冠形図と樹形図については7月下旬と同じであると見なし、第8図には示していない。また、9月下旬と10月下旬の総葉数（TNL）は

7月下旬に等しくならなかった。2年前の下垂処理以降もOLEASによる剪定処理が続いたため、これによる若干の違いが発生したためである。

第9図にOC-1樹の樹齢15年のHMPPFD、HMPNおよびHMPNOの季節的变化を示した。HMPPFDは各時期の葉量と投射光強度の両者の違いによる影響を強く受け、晴天日では5月中旬が最も大きく、10月下旬が最も小さかった（第9図左上）。曇天でも似た傾向であったが、全体的に数値は減少し、季節間の差も減少した（第9図左下）。HMPNは各時期の葉面PPFDのほかに、気温、VPD、展葉後日数などのPn重回帰推定式に用いられた説明変数値による影響も受け、晴天日と曇天日とも6月下旬で最も大きく、次いで7月下旬が大きく、5月中旬が最も小さく、10月下旬がこれに次いで小さかった（第9図中）。HMPNOの季節的变化はHMPNとほぼ似た季節的变化を示したが、葉量の違い、したがって、園地LAI

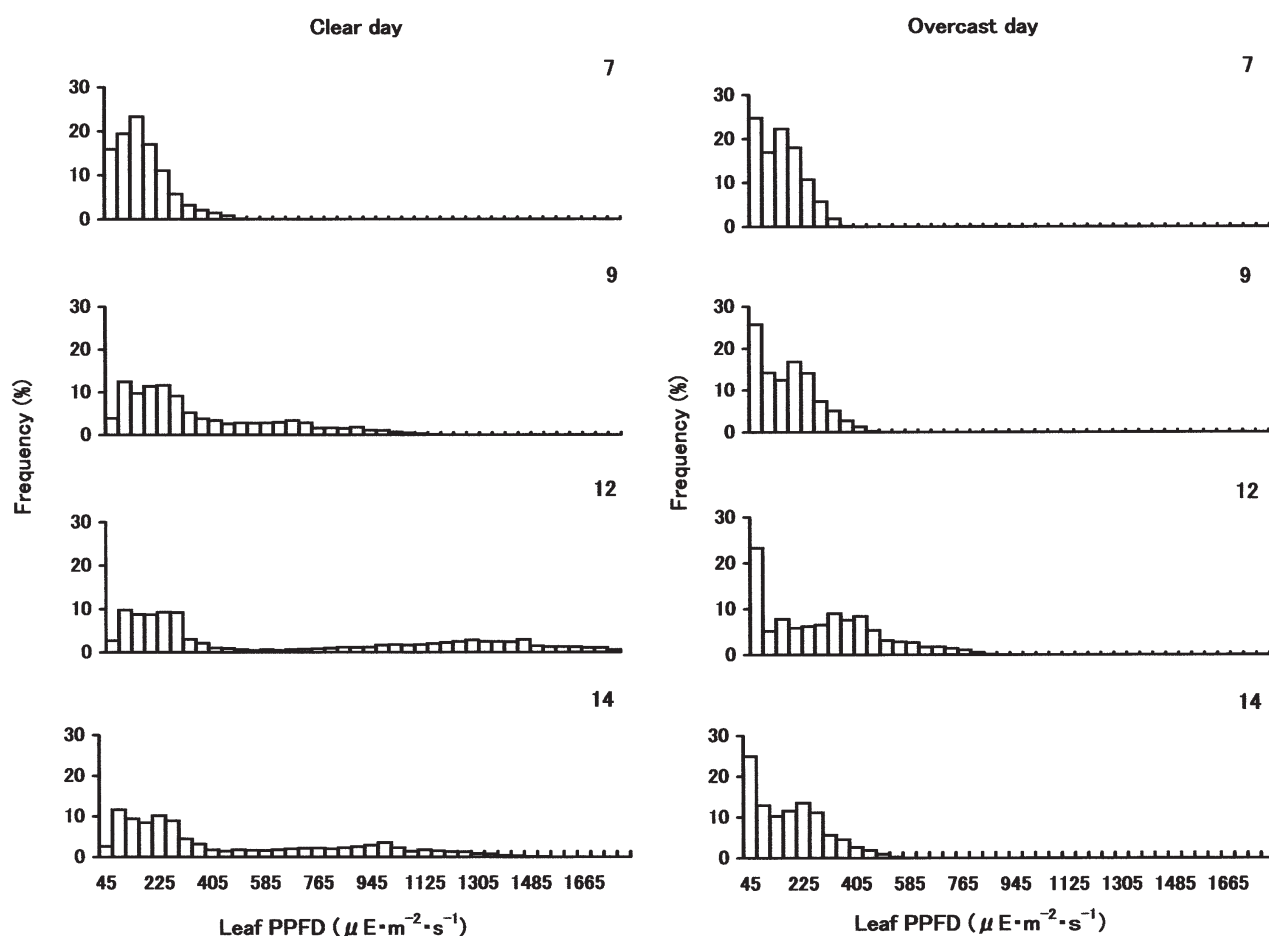


Fig.2 Frequency distributions of leaf PPFDs at several hours in daytime in the end of July of the OC-1 tree (15 year of tree age). The left side shows a clear day, and the right side shows an overcast day. The numerals indicate hours in daytime.

の違いも重複して現れた（第9図右）。なお、他の樹にも類似の傾向が認められた（データ略）。

5つの仕立て方法各1樹（第1表）についてDMPPFD、DMPNおよびDMPNOの樹齢15年における季節的变化を第10図に示した。晴天日と曇天日とも、DMPPFDは季節の推移ともに減少し（第10図左）、DMPNとDMPNOは6月下旬にピークが見られた。6月下旬から8月下旬までの夏季は総じて光環境が悪化するにもかかわらず、物質生産にとって重要な期間であることが認められた（第10図）。

ところで、5月中旬の朝夕における推定Pn値の一部にマイナス値が発生した。このときの条件から見て、暗呼吸とは考えられなかったので異常値と考え、全てゼロと見なして集計したことを断っておきたい。この異常値に関する考えられる理由については考察に記した。

### 3. 樹冠内全葉における葉面PPFDとPnの平均値および園地当たり純光合成速度の経年的変化

第11図は5つの仕立て方法各1樹（第1表）の樹齢5年、10年、15年および20年における樹冠形図（南面図）を示したものである。仕立て方法の違いによる樹冠形の違いおよび樹齢上昇に伴った樹冠形の変化が認められた。第11図右端は樹齢15年におけるグリッド内葉ブロック（leafy block）を積み木として表示したものであった。

第12図にOC-1樹における幾つかの樹冠形状値の経年的変化を示した。樹高、葉数、葉層容積、樹冠占有面積当たり葉面積指数（以下、LAIc）などは樹齢9年頃まで樹齢の上昇に伴い急増した（第12図）。一方、設定したLAIaに基づく葉量調節処理と割り当て空間への抵触のため、間引き量や切り返し量も次第に増大した（データ略）。樹のサイズに関連した数値は樹齢10年の頃にはプラトーに達し、以降は停滞した（第12図）。CACOAS

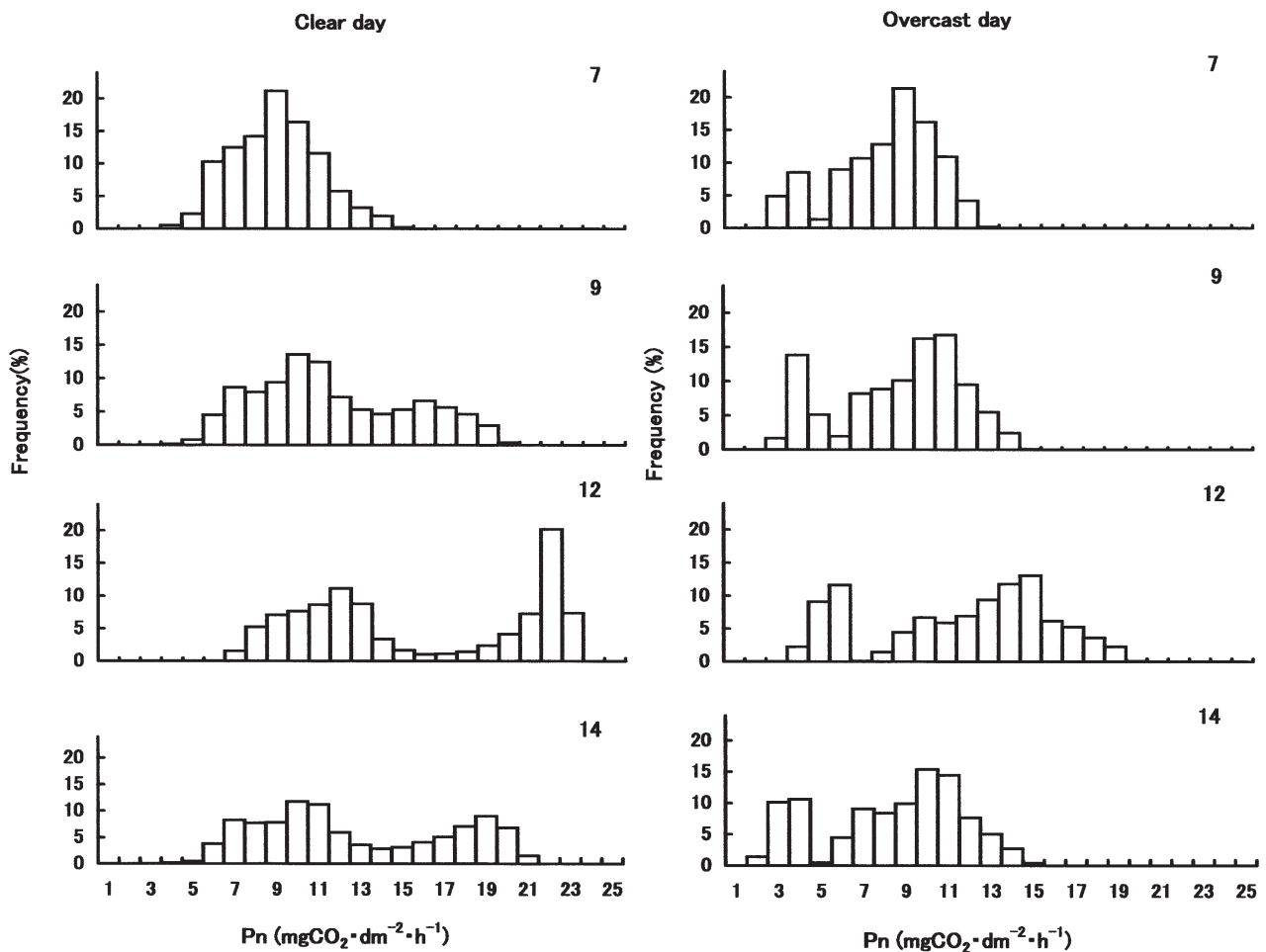


Fig.3 Frequency distributions of leaf Pns at several hours in daytime in the end of July of the OC-1 tree (15 year of tree age). The left side shows a clear day, and the right side shows an overcast day. The numerals indicate hours in daytime.



の2種類の葉量自動調節機能により割り当て土地面積当たり葉面積指数 (LAIa) はその目標値通りに推移し、園地 LAI (LAIo) もこれらに比例して漸増した (第12図)。

OC-1 樹の晴天日と曇天日の幾つかの時刻における HMPPFD, HMPN および HMPNO の経年的変化を第13図に示した。第12図に示された葉量の増大, したがって園地 LAI の増大に伴い, 晴天日の HMPPFD と HMPN は樹齢10年頃までは急速に低下し, HMPNO は急速に増大した (第13図上)。しかし, 園地 LAI の増大が緩やかになった樹齢10年以降, 上記数値は緩やかに変化した (第13図上)。曇天日の樹齢6年までは複雑な起伏が現れたが, 樹齢10年以降, 晴天日同様に上記数値は緩や

かに変化した (第13図下)。他の樹にも類似の傾向が認められた (データ略)。なお, 晴天日における樹齢1年の HMPPFD と HMPN が樹齢2年より小さかったことの考えられる理由は考察に記した。

DMPPFD, DMPN および DMPNO の経年的変化を5樹まとめて第14図に示した。上記の HMPPFD などに類似した経年的変化が5樹とも見られ, 晴天日の DMPPFD と DMPN は樹齢10年頃までは急速に減少し (第14図左と中), DMPNO は急速に増大した (第14図右)。樹齢10年以降, これらの数値は緩やかに変化した (第14図上)。曇天日についても第13図に類似した傾向の経年的変化が認められた (第14図下)。

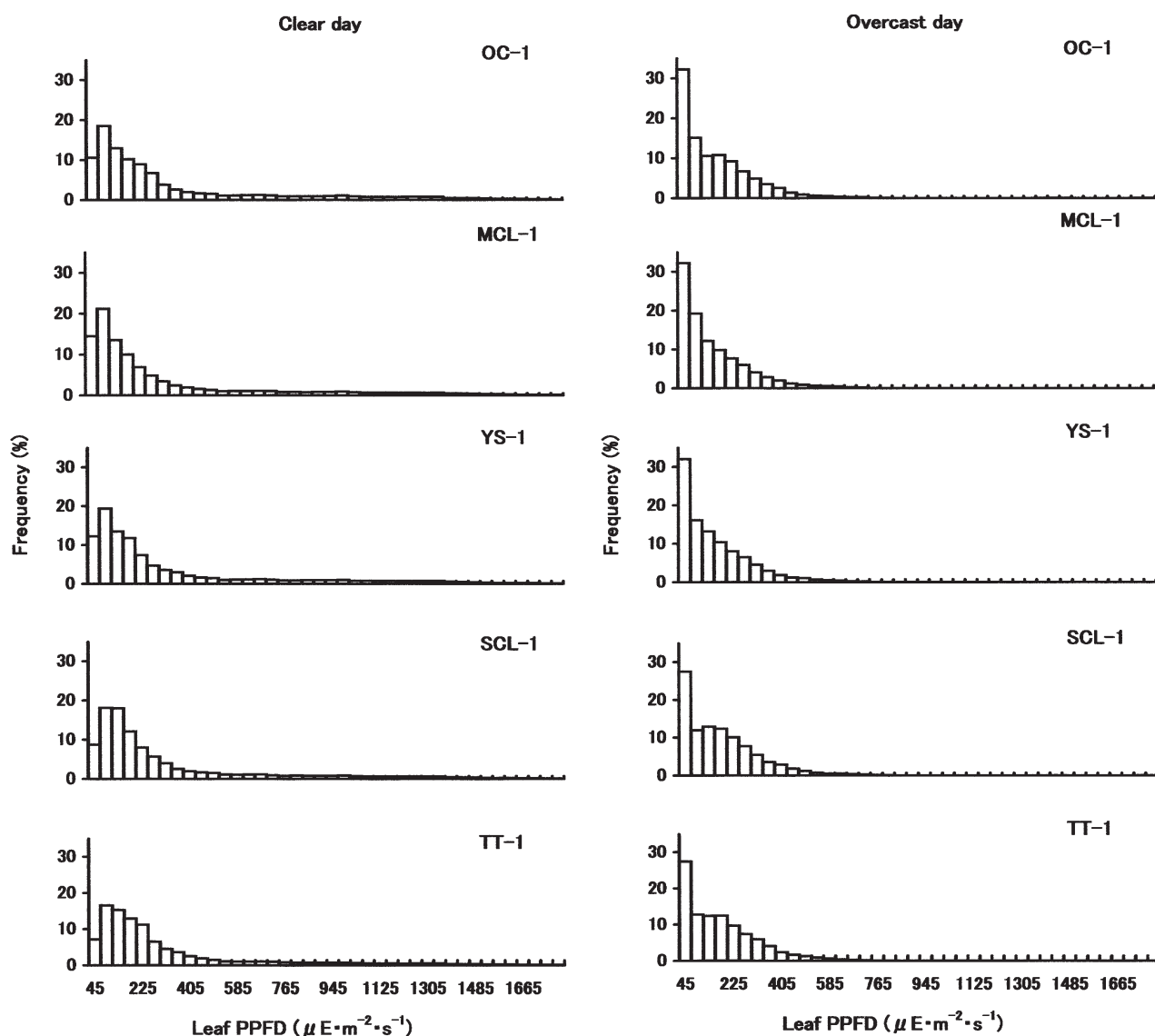


Fig.4 Daily frequency distributions of leaf PPFDs in the end of July of the five trees (15 year of tree age). The left side shows a clear day, and the right side shows an overcast day.

#### 4. 樹列方向の違いが樹冠内全葉における葉面PPFDの毎時平均値と日平均値に及ぼす影響

樹齢15年7月下旬の晴天日における5つの仕立て方法各5樹（第1表）の葉面PPFD毎時平均値（C6HMPPFD～C18HMPPFD）と日平均値（CDMPPFD）について、南北樹列（SN）と東西樹列（EW）の間で比較した（第3表）。本シミュレーションにおいては個々の樹について反復実験を行っても全く同じ結果になった。したがって、各樹におけるシミュレーション結果における数値の違いは樹列方向の違いをそのまま表したことになる。第3表内では結果を見やすくするため、東西樹列の数値が南北樹列より大きかった場合に限り下線を付けた。開心

形（OC）、変則主幹形（MCL）および細形主幹形（SCL）では2種類の大小関係がどちらかに大きく偏ることなく混在したことが認められた（第3表）。ところが、Y字形（YS）では全ての時刻および1日の平均値とも南北樹列の数値が大きく、一方、トレリス誘引（TT）ではほとんどの時刻および1日の平均値で東西樹列の数値が大きかった（第3表）。曇天日の結果（第4表）にもおよそ似た傾向が認められ、Y字形（YS）におけるほとんどの時刻および1日の平均値で南北樹列の数値が大きく、一方、トレリス誘引（TT）と開心形（OC）における多くのケースで東西樹列の数値が大きかった。ただし、上記の差そのものは非常に小さく、晴天では数値の1%以

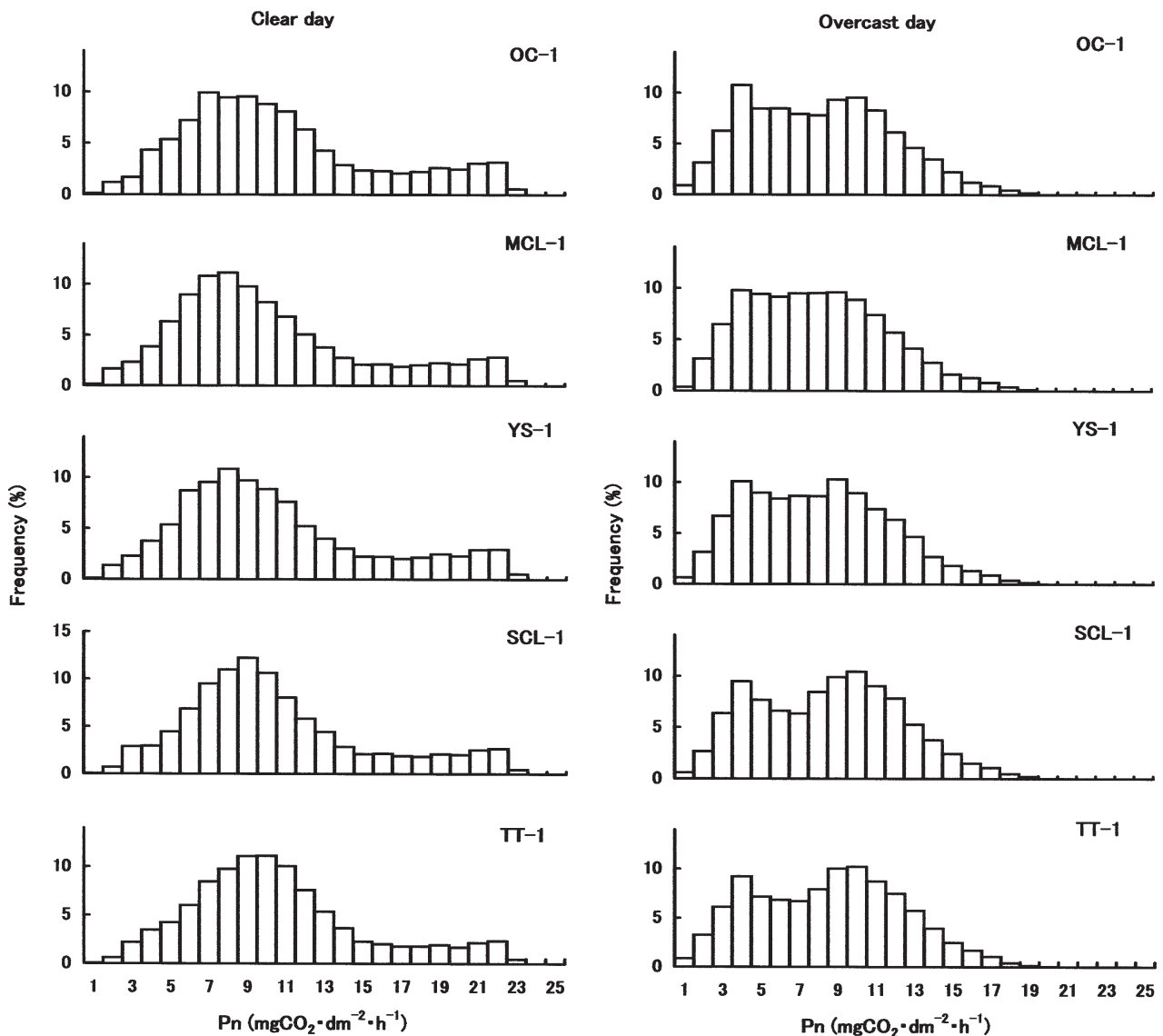


Fig.5 Daily frequency distributions of Pns in the end of July of the five trees (15 year of tree age). The left side shows a clear day, and the right side shows an overcast day.

下（第3表），曇天では大きくても2%前後であった（第4表）。また，同一仕立て方法でも樹が異なったときには，数値そのものが大きく変わり，上記の差を上回った。このため，各仕立て方法内5樹平均値を樹列方向間で比較しても両者には有意差が認められなかった。

#### 5. 栽植距離を固定したうえでの着生葉量（したがって園地LAI）の違いが果樹園の光環境と光合成に及ぼす影響

OC-1樹の樹齢15年7月下旬の晴天日と曇天日，数時刻のHMPPFD，HMPNおよびHMPNOと園地LAI（LAIo）の関係を第15図に示した。本実験で設定した園地LAIの最大値（約2.5）は樹冠占有面積当たり葉面積

指数（LAIc）に換算すると約9に相当し，栽培果樹におけるLAIcとしては極めて大きい数値であった。園地LAIの増大に伴い，HMPPFDとHMPNは，最初は急速に減少し，次第にゆっくりと減少し，設定した園地LAIの範囲内では両者とも対数近似曲線状に減少し続けた（第15図左および中）。HMPNOは園地LAIの増大に伴い最初は急速に増大し，次第にゆっくりと増大し，設定した園地LAIの範囲内では冪乗近似曲線状に増大し続けた（第15図右）。他の時刻および他の4樹についても類似した変化が見られた（データ略）。

5つの仕立て方法各1樹（第1表）の園地LAIとDMPPFDおよびDMPNの関係を第16図に示した。5樹とも第15図のHMPPFDやHMPNの曲線に類似した変

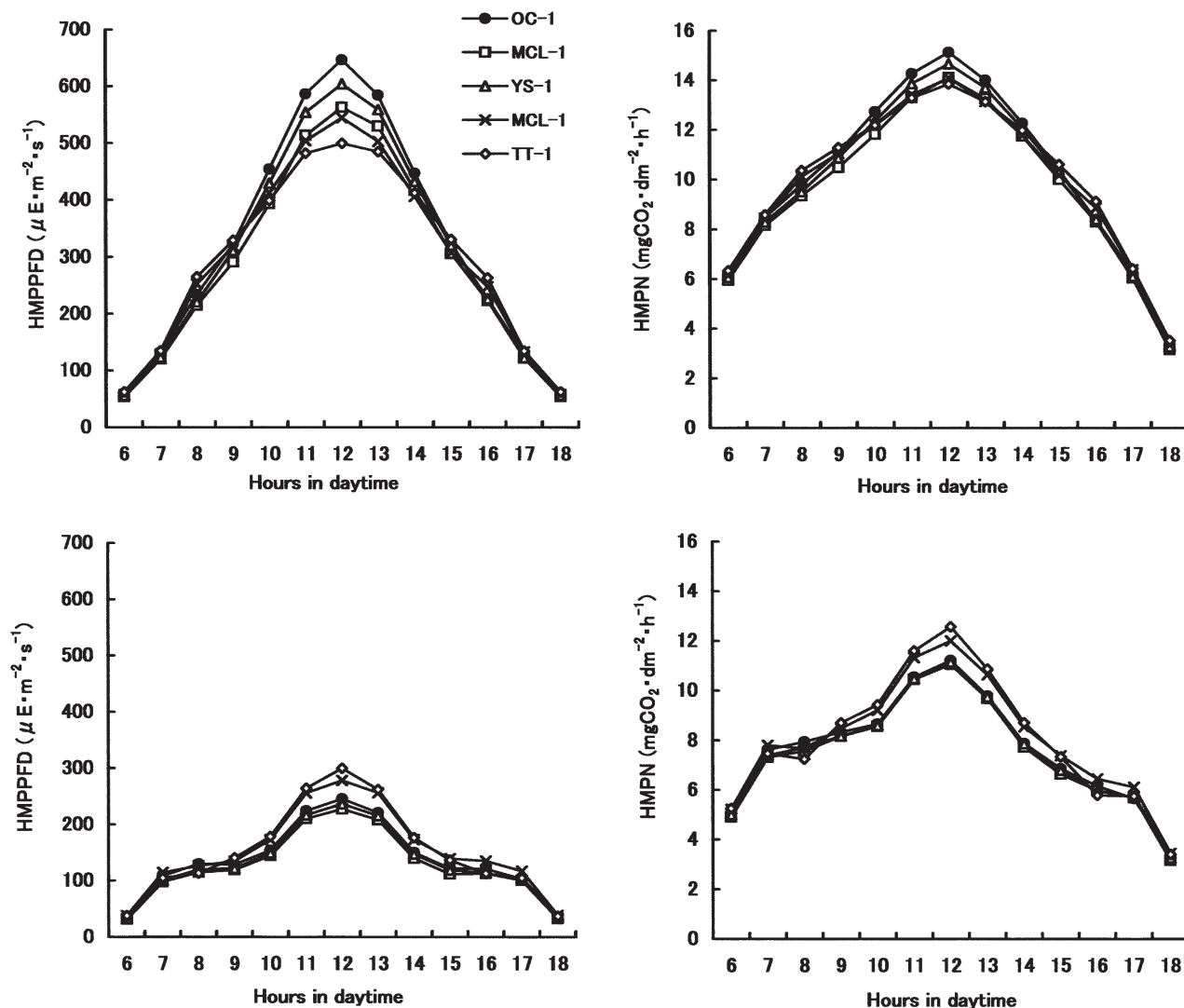


Fig.6 Diurnal changes in hourly mean leaf PPFD (HMPPFD, left) and hourly mean Pn (HMPN, right) on a clear day (upper) and an overcast day (lower) in the end of July of the five trees (15 year of tree age).

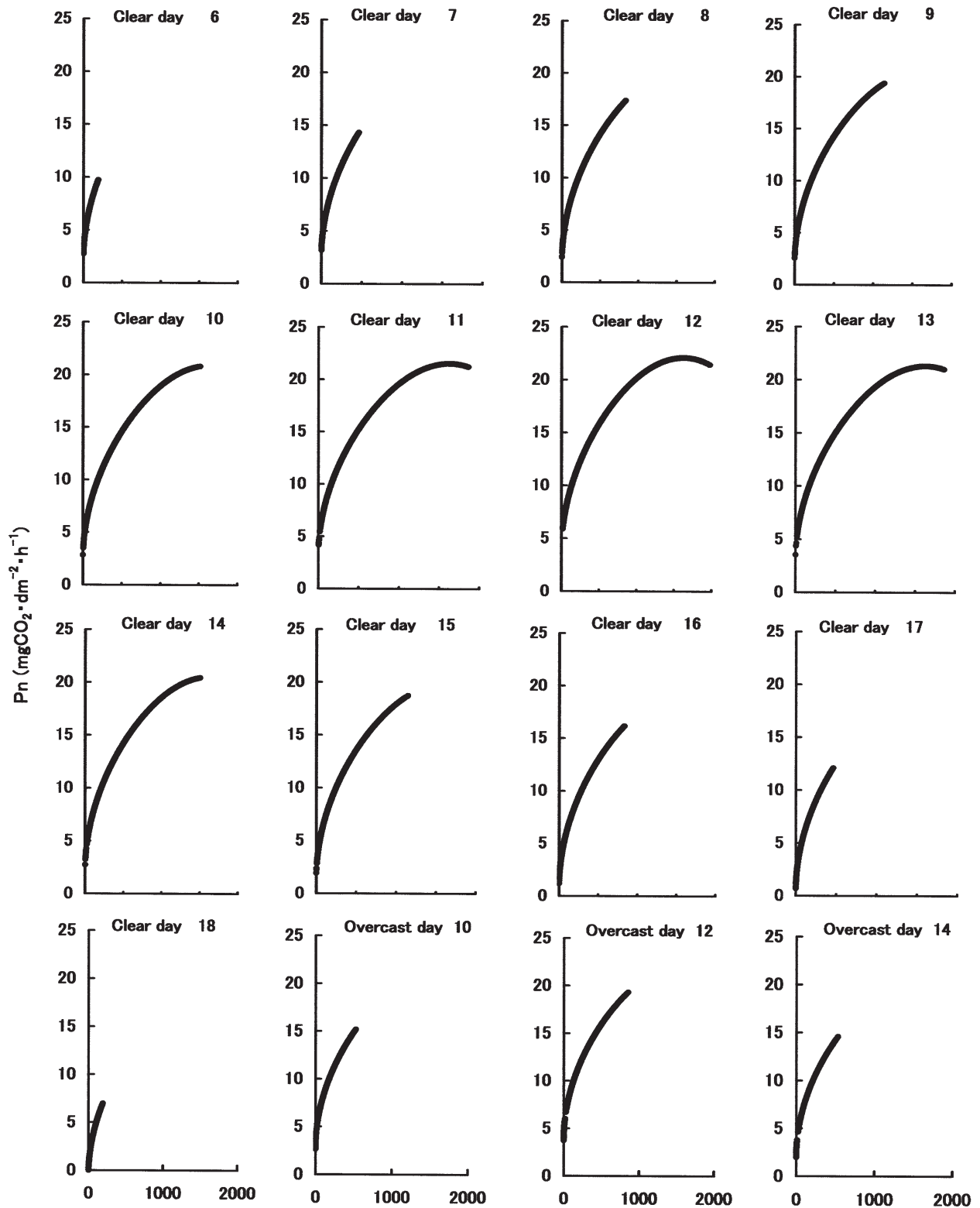


Fig.7 Relations between leaf PPFDs and  $P_n$ s at several hours in daytime on a clear day and an overcast day in the end of July of the OC-1 tree of 15 year of tree age. The numerals indicate hours in daytime.



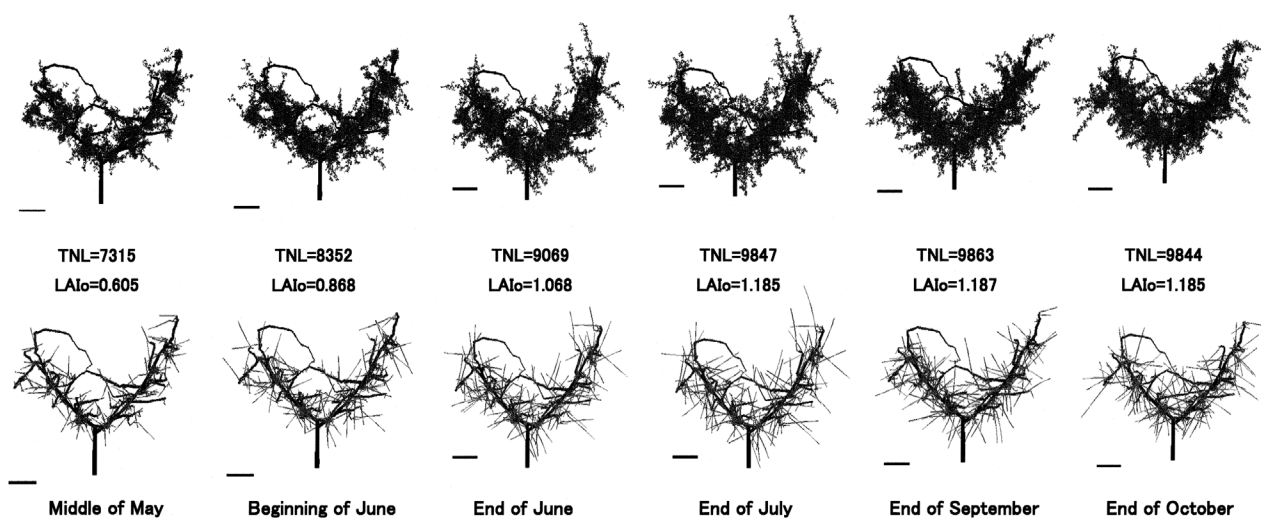


Fig.8 Examples of projected images (south side views) of tree canopies at several stages in 15 year of tree age of the YS-1 tree (upper) and that of tree shapes (lower). The crossbars indicate 50 cm. TNL and LAIo indicates total number of leaves and leaf area index per orchard land area, respectively.

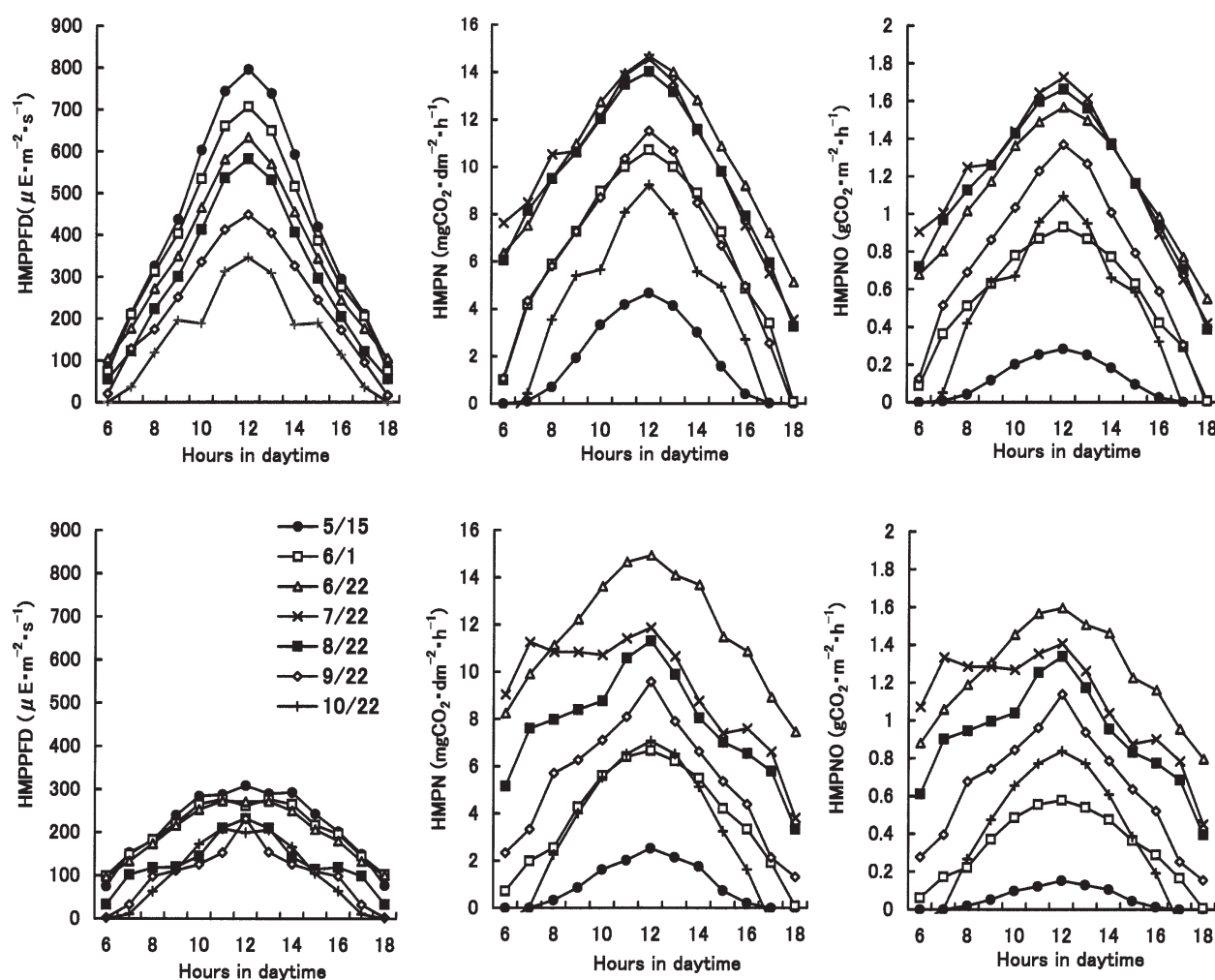


Fig.9 Diurnal changes in hourly mean leaf PPFD (HMPFPD, left), hourly mean Pn (HMPN, middle) and hourly mean Pn per orchard (HMPNO, right) in the seven seasonal stages of OC-1 tree (15 of year of tree age). The upper and the lower indicates a clear days in each stage and the overcast day, respectively.

化が見られ、園地 LAI に対して DMPPFD と DMPN は対数近似曲線状に減少した (第 16 図)。晴天日と曇天日における園地 LAI の増大に伴う DMPNO の変化をそれぞれ第 17 図上と第 18 図上に 5 樹別々に示した。園地 LAI の増大に伴って DMPNO は冪乗近似曲線状に増大した。また、これらの曲線の両端を結ぶ弦を書き入れたところ、園地 LAI の小さいところでは急速に増大し、園地 LAI の大きいところで緩慢に増大したことが読み取れた (第 17 図上および第 18 図上)。この急速な増大から緩慢な増大の切り替え点を見いだすため以下の解析計算を行った。最初に単位量の園地 LAI 増大に対する DMPNO 増大量の比 (DMPNO 勾配) と園地 LAI の間の散布図を描いた。次に、プロットされた DMPNO 勾配データのうち、園地 LAI の増大に対して急速に減少したデータ群と緩慢に減少したデータ群に分け、それぞれ、回帰直線を引いた (第 17 図下および第 18 図下)。この場合、OLEAS の出力値がばらついた園地 LAI が非常に小さかった領域と両データ群の境界領域におけるデータをあらか

じめ除外したことを断わっておく。次に、両回帰直線の交差点から、切り替え点における園地 LAI を内挿推定した (第 17 図下および第 18 図下)。その結果、切り替え点の園地 LAI は、晴天日、曇天日および 5 樹とも 1 付近であった。以下、この急速な増大から緩慢な増大への切り替え点における園地 LAI を“園地 LAI 特異点”と記す。果樹の物質生産における園地 LAI 特異点の考えられる意味については考察に記した。

## 6. 着生葉量と割り当て土地区画を固定したうえでの栽植密度の違いが果樹園の光環境と光合成に及ぼす影響

OC-1 樹の樹齢 15 年における 7 月下旬の晴天日と曇天日、正方形植えの場合の栽植密度と数時刻の HMPPFD、HMPN および HMPNO の関係を第 19 図に示した。この図における栽植密度の最高値は割り当て区画どうしが密接したときの値で約 62 本/10a であった。この状態からブロック 1 辺長ずつ南北方向および東西方向に割り当て区画どうしを引き離し、栽植密度を低下させたとき、

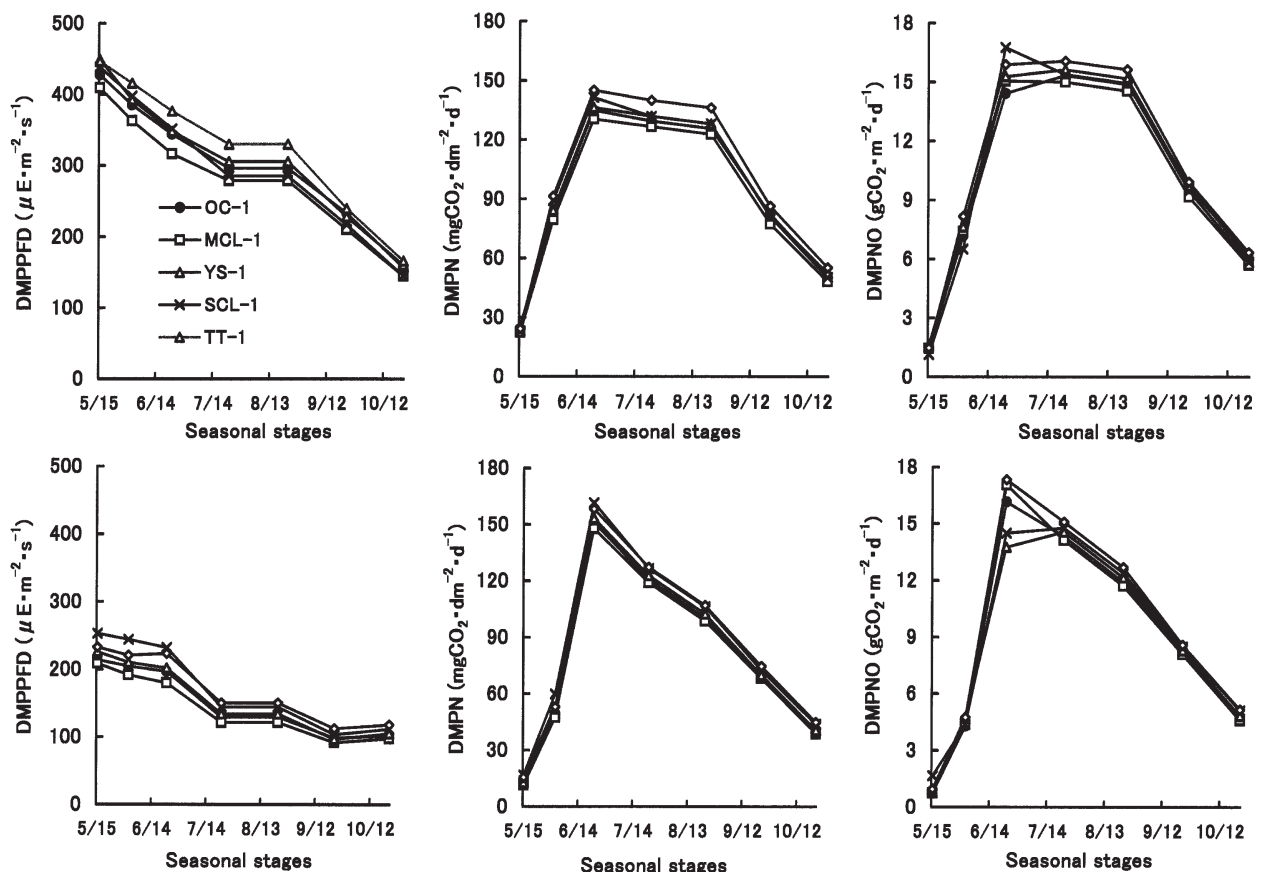


Fig.10 Seasonal changes in daily mean leaf PPFD (DMPPFD, left), daily mean Pn (DMPN, middle) and daily mean Pn per orchard (DMPNO, right) of the five trees (15 year of tree age) on a clear day (upper) and an overcast day (lower) in each seasonal stage.

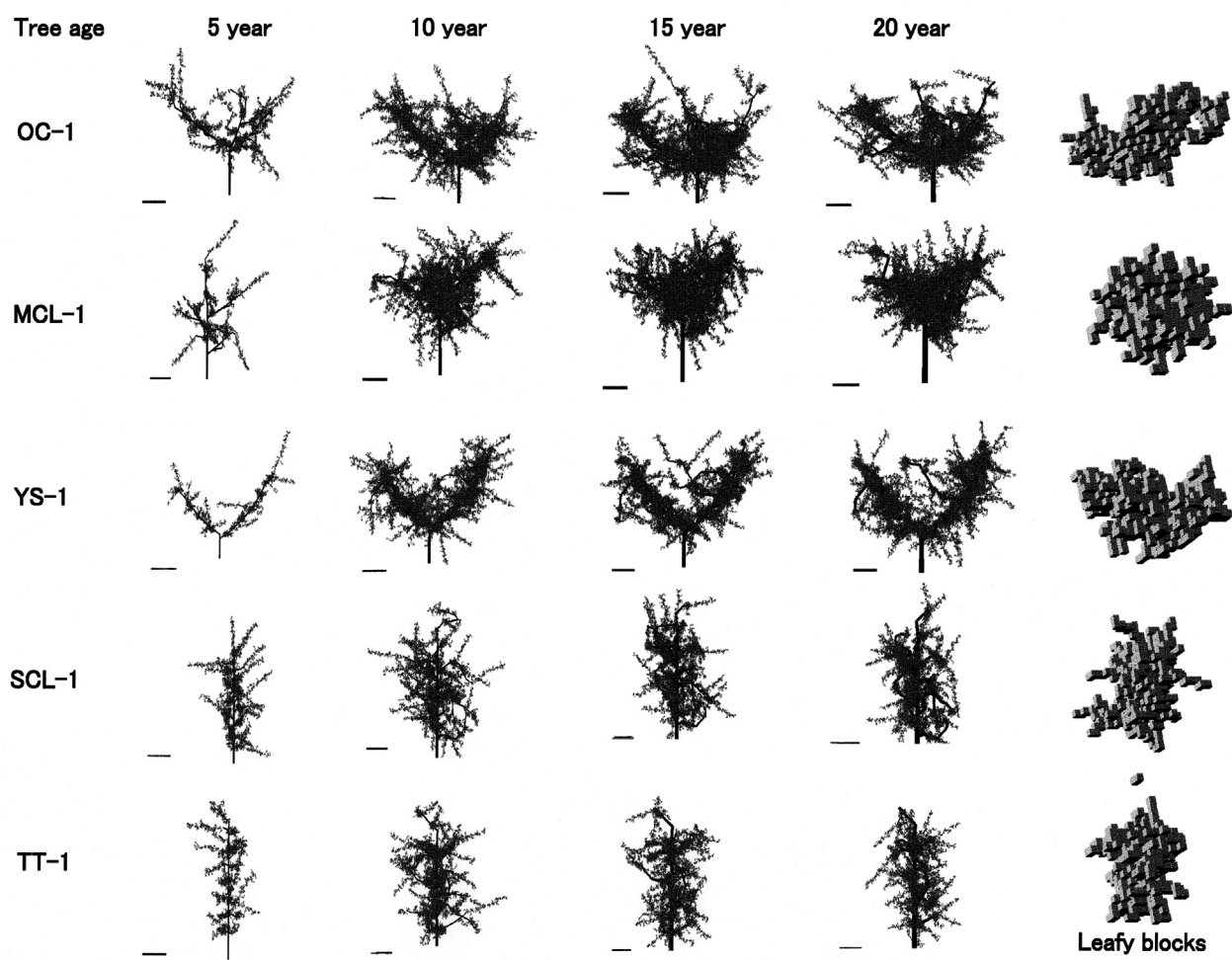


Fig.11 Examples of projected images (south side views) of tree canopies at four tree ages of the five trees, and the builds made up of leafy blocks at 15 year of tree age (right end). The latter were looked at an elevation angle of 30 degrees in a direction of 20 degrees from north to west. The crossbars indicate 50 cm.

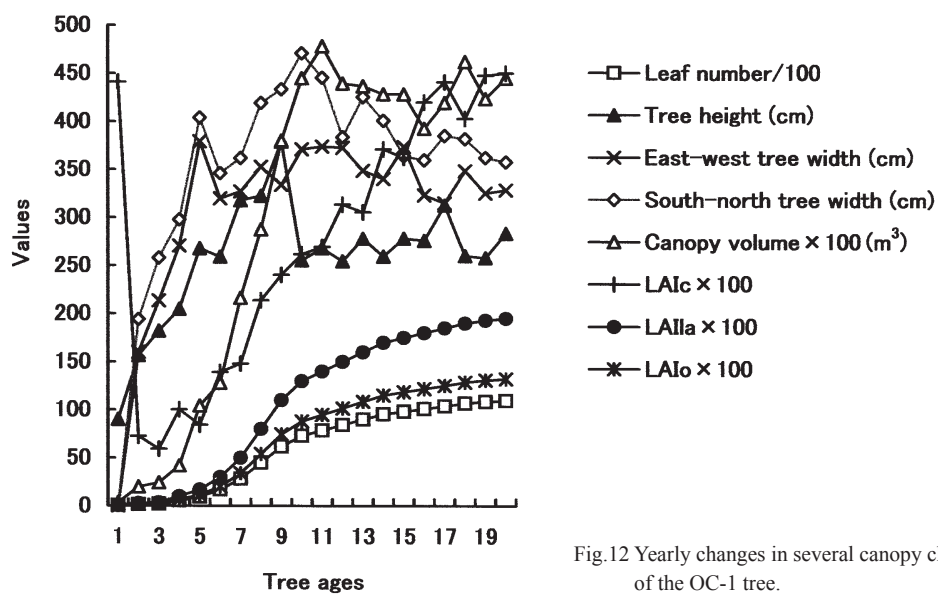


Fig.12 Yearly changes in several canopy characteristics of the OC-1 tree.

HMPPFDとHMPNは僅かに増大し、約20本/10a以下ではほぼ一定値になった(第19図左と中)。なお、5.までの実験に用いた園地LAIに相当する栽植密度は約41本/10aであった。一方、HMPNOは栽植密度の上昇に伴いほぼ直線的に増大した(第19図右)。約41本/10aにおけるHMPPFDとHMPNに比べ、約62本/10aにおけるHMPPFDとHMPNの減少割合は晴天日で約2%以下、曇天日で約3%以下であった。一方、HMPNOの増大割合は約50%以上であった。他の時刻および他の樹にも類似した結果が得られた(データ略)。5つの仕立て方法各1樹(第1表)の晴天におけるDMPPFD、DMPNおよびDMPNOと栽植密度の関係にも第19図に類似した傾向が認められた(第20図)。ところで、細形主幹形(SCL)とトレリス誘引(TT)における栽植密度上昇に対するDMPNO増大の勾配が他の3仕立て方法に比べ緩かったが(第20図)、割り当て土地区画面積が小さいことによ

る当然の結果であった。なお、第20図のDMPPFDとDMPNの縦軸目盛が拡大表示されているので注意されたい。曇天においても上記と同様な傾向が認められた(データ略)。

並木植えのOC-1樹の樹齢15年における7月下旬の晴天日と曇天日、幾つかの時刻のHMPPFD、HMPNおよびHMPNOと栽植密度との関係を第21図に示した。この図における栽植密度の最高値は割り当て区画どうしが密接したときの値であり、正方形植えの場合と同じ約62本/10aであった。この状態からブロック1辺長ずつ割り当て区画どうしを東西方向に引き離しながら栽植密度を低下させたとき、HMPPFDとHMPNは僅かに増大し、約35本/10a以下ではほぼ一定値になった(第21図左と中)。一方、HMPNOは栽植密度の上昇に伴いほぼ直線的に増大した(第21図右)。5.までの実験に相当した約41本/10aにおけるHMPPFDおよびHMPNに比べ、

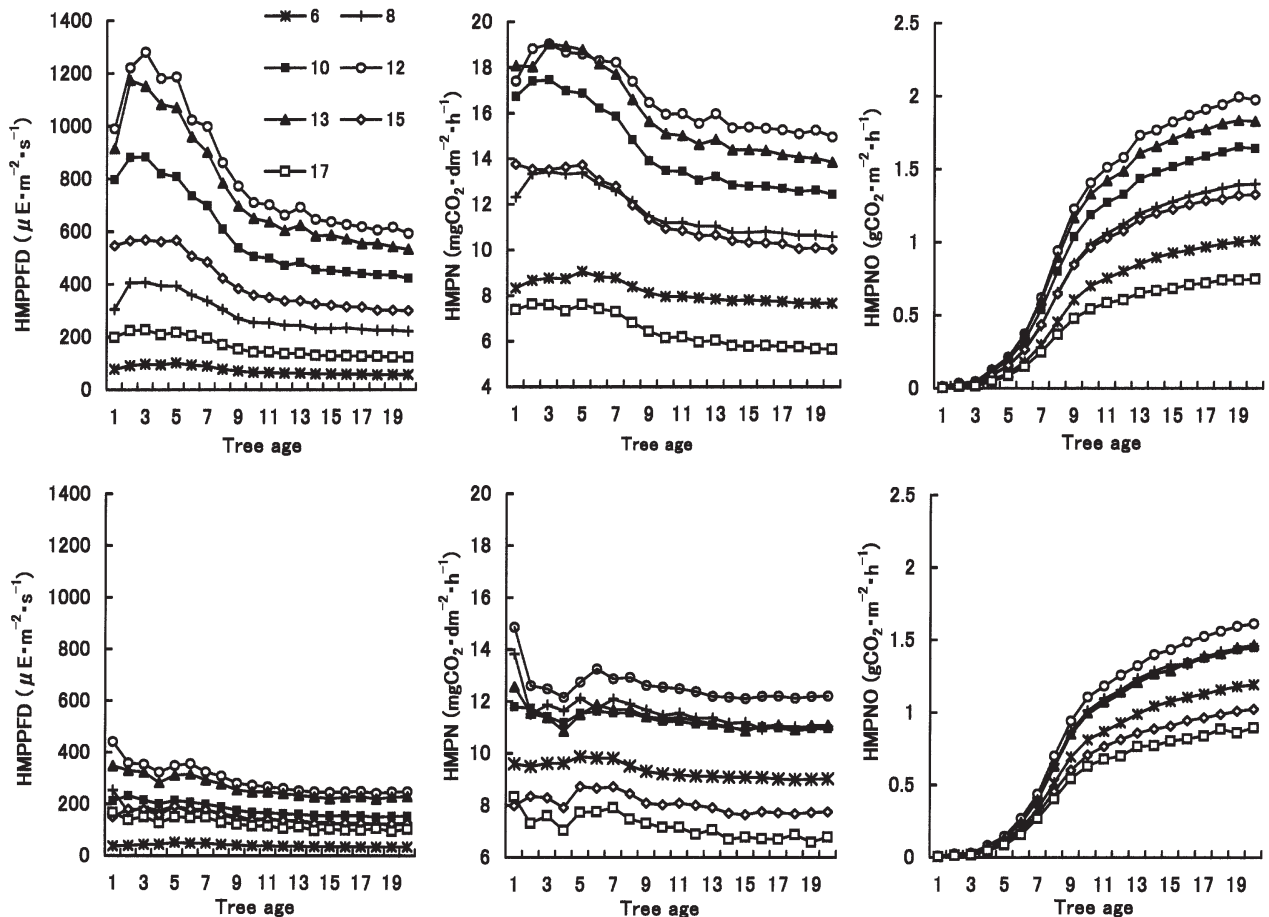


Fig.13 Yearly changes in hourly mean leaf PPFD (HMPPFD, left), hourly mean Pn (HMPN, middle) and hourly mean Pn per orchard (HMPNO, right) of the OC-1 tree on a clear day (upper) and an overcast day (lower) in the end of July of each tree age. The numerals indicate hours in daytime.



約62本/10aにおけるHMPPFDおよびHMPNの減少割合は晴天で約2.3%以下および曇天で約2.5%以下であった。一方、HMPNOの増大割合は約50%以上であった。他の時刻および他の樹にも類似した結果が得られた（データ略）。

並木植えの5つの仕立て方法各1樹（第1表）の晴天におけるDMPPFD、DMPNおよびDMPNOと栽植密度の関係にも第21図に類似した傾向が認められた（第22図）。また、曇天においても同様であった（データ略）。なお、割り当て土地区画のサイズが異なった細形主幹形（SCL）とトレリス誘引仕立て（TT）の栽植密度の最高値は、それぞれ、約111本/10aおよび約82本/10aであった（第22図）。

要するに、正方形植えと並木植え、いずれも、割り当て土地区画を保持したままで栽植密度を最高にすれば、光環境はほとんど悪化せず、園地純光合成速度を大きく増大できることが認められた。

## 7. 計画的密植栽培における果樹園内光環境と光合成

OC-1樹に限り、永久樹列の真ん中に間伐予定樹列を並べて配植した密植栽培園における7月下旬、晴天日と曇天日のHMPPFD、HMPNおよびHMPNOの経年的変化を第23図に示した。永久樹のみの栽培（以下、普通栽培）の経年的変化図（第13図）に比較して、密植栽培園のHMPPFDとHMPNは僅かに減少したものの（第23図左と中）、密植栽培園のHMPNOは普通栽培園の2倍近くまでに増大した（第23図右）。他の仕立て方法の樹にも類似の傾向が認められた（データ略）。5種類の仕立て方法各1樹（第1表）の密植栽培園におけるDMPNOの経年的変化を第24図中に示した。この場合にも第23図右のHMPNOと同様に普通栽培園の2倍近くまでに増大した（第24図左と中）。次に、第12図に示したように、葉層容積などがプラトーに近づいた樹齢10年まで密植栽培を続け、樹齢11年から間伐予定樹を間伐し、永久樹のみに変更した場合（一種の計画的密植栽培）、このときのDMPNOの経年的変化を第24図右に示した。さらに、

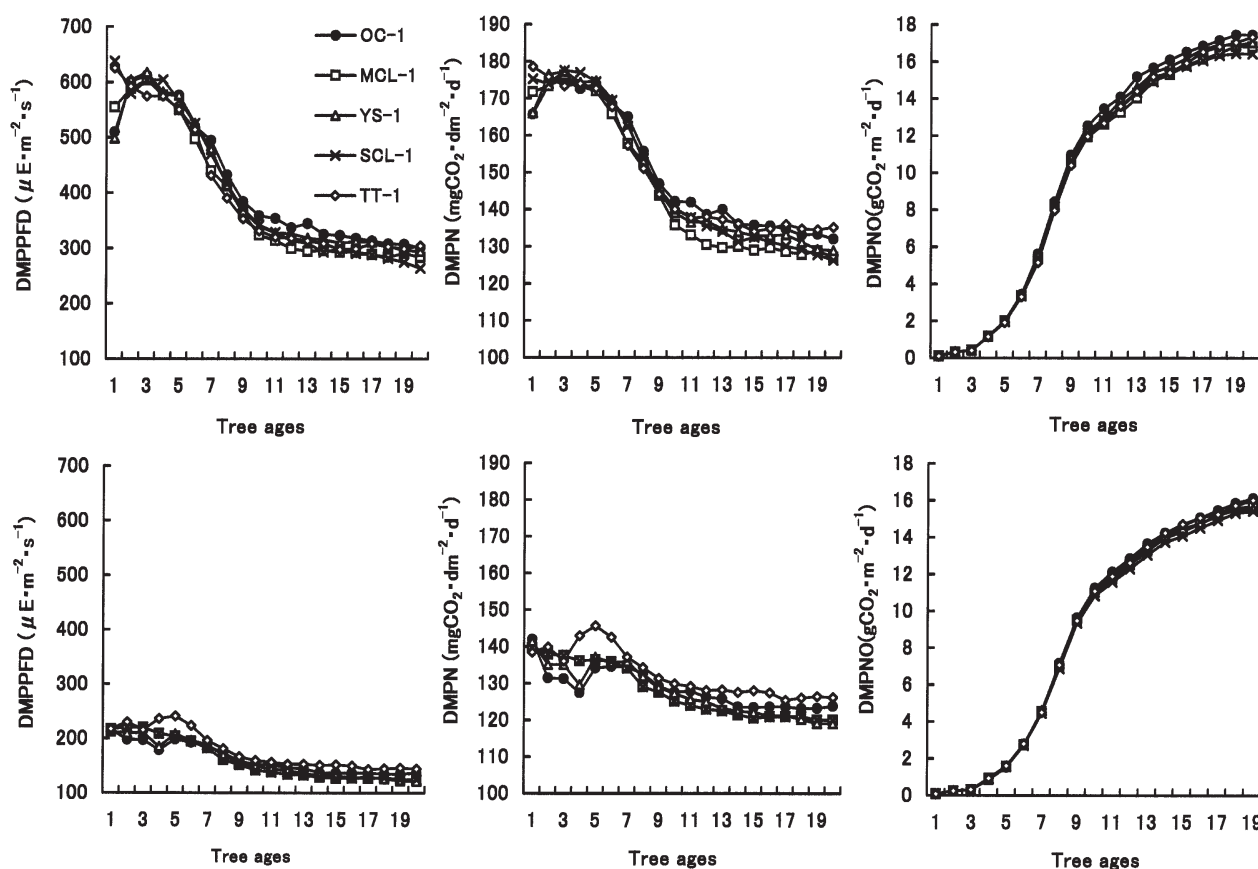


Fig.14 Yearly changes in daily mean leaf PPFD (DMPPFD, left), daily mean Pn (DMPN, middle) and daily mean Pn per orchard (DMPNO, right) of the five trees on a clear day (upper) and an overcast day (lower) in the end of July.

Table 3. Comparisons of hourly mean leaf PPFD (HMPPFD) between south-north row (SN) and east-west row (EW) of the five trees per training system (Table 1) on a clear day in the end of July (15 year of tree age). The underlines indicate cases that the PPFD value of east-west row was larger than that of south-north.

	RD <sup>2</sup>	OC-1	OC-2	OC-3	OC-4	OC-5	Mean	MCL-1	MCL-2	MCL-3	MCL-4	MCL-5	Mean	YS-1	YS-2	YS-3	YS-4	YS-5	Mean
C6HM	SN	<u>62.4</u>	<u>60.5</u>	<u>60.1</u>	<u>59.1</u>	<u>55.1</u>	<u>59.4</u>	<u>55.7</u>	<u>55.4</u>	<u>54.0</u>	<u>55.6</u>	<u>53.8</u>	<u>54.9</u>	61.8	57.0	56.4	59.9	58.1	58.6
	PPFD EW	<u>62.6</u>	<u>60.6</u>	<u>60.8</u>	<u>59.9</u>	<u>55.7</u>	<u>59.9</u>	<u>56.4</u>	<u>55.5</u>	<u>54.3</u>	<u>56.2</u>	53.8	<u>55.2</u>	60.7	56.8	56.2	59.9	57.4	58.2
C7HM	SN	<u>136.0</u>	<u>132.7</u>	<u>132.1</u>	<u>128.8</u>	<u>122.9</u>	<u>130.5</u>	<u>124.7</u>	<u>122.5</u>	<u>120.2</u>	<u>123.1</u>	<u>118.5</u>	<u>121.8</u>	132.6	124.3	123.5	132.1	127.9	128.1
	PPFD EW	<u>136.5</u>	<u>132.5</u>	<u>133.5</u>	<u>129.0</u>	<u>122.1</u>	<u>130.7</u>	<u>125.5</u>	<u>122.1</u>	<u>120.0</u>	<u>122.7</u>	<u>119.3</u>	<u>121.9</u>	130.2	123.0	122.7	130.3	126.2	126.5
C8HM	SN	<u>240.7</u>	<u>237.4</u>	<u>233.9</u>	<u>230.4</u>	<u>219.8</u>	<u>232.4</u>	<u>223.1</u>	<u>220.3</u>	<u>214.5</u>	<u>214.8</u>	<u>210.2</u>	<u>216.6</u>	237.1	222.6	220.7	235.6	230.7	229.3
	PPFD EW	<u>239.6</u>	<u>237.7</u>	<u>234.4</u>	<u>232.1</u>	<u>221.7</u>	<u>233.1</u>	<u>225.5</u>	<u>219.6</u>	<u>214.2</u>	<u>215.7</u>	207.8	<u>216.5</u>	234.2	221.4	219.8	234.2	228.9	227.7
C9HM	SN	<u>339.0</u>	<u>336.5</u>	<u>322.7</u>	<u>327.0</u>	<u>312.1</u>	<u>327.5</u>	<u>311.4</u>	<u>293.7</u>	<u>291.0</u>	<u>284.1</u>	<u>282.6</u>	<u>292.6</u>	329.9	299.6	311.0	320.7	326.6	317.6
	PPFD EW	<u>340.6</u>	<u>336.9</u>	<u>328.1</u>	<u>328.2</u>	<u>312.2</u>	<u>329.2</u>	<u>313.5</u>	<u>294.0</u>	<u>291.0</u>	<u>284.0</u>	<u>287.4</u>	<u>294.0</u>	326.3	297.6	309.8	317.8	324.2	315.1
C10HM	SN	<u>478.9</u>	<u>480.1</u>	<u>454.6</u>	<u>464.6</u>	<u>437.4</u>	<u>463.1</u>	<u>432.4</u>	<u>402.8</u>	<u>393.7</u>	<u>401.9</u>	<u>392.5</u>	<u>404.7</u>	453.1	418.7	429.5	449.5	452.9	440.7
	PPFD EW	<u>474.6</u>	<u>477.7</u>	<u>455.6</u>	<u>468.6</u>	<u>436.7</u>	<u>462.6</u>	<u>432.6</u>	<u>401.9</u>	<u>396.0</u>	<u>399.0</u>	<u>393.1</u>	<u>404.5</u>	449.3	416.4	428.0	446.1	449.9	437.9
C11HM	SN	<u>620.7</u>	<u>633.8</u>	<u>586.4</u>	<u>619.2</u>	<u>563.0</u>	<u>604.6</u>	<u>566.7</u>	<u>522.9</u>	<u>513.8</u>	<u>520.7</u>	<u>512.1</u>	<u>527.2</u>	586.6	548.3	554.0	582.2	589.6	572.2
	PPFD EW	<u>624.5</u>	<u>631.9</u>	<u>592.8</u>	<u>617.8</u>	<u>563.5</u>	<u>606.1</u>	<u>567.4</u>	<u>525.9</u>	<u>514.0</u>	<u>517.4</u>	<u>516.1</u>	<u>528.2</u>	582.7	546.0	552.6	578.5	586.4	569.2
C12HM	SN	<u>687.6</u>	<u>695.1</u>	<u>646.5</u>	<u>676.6</u>	<u>615.9</u>	<u>664.3</u>	<u>630.8</u>	<u>579.2</u>	<u>562.8</u>	<u>568.4</u>	<u>562.4</u>	<u>580.7</u>	630.7	603.4	604.2	626.6	645.7	622.1
	PPFD EW	<u>685.5</u>	<u>699.7</u>	<u>649.5</u>	<u>675.5</u>	<u>614.1</u>	<u>664.9</u>	<u>630.7</u>	<u>581.3</u>	<u>568.6</u>	<u>568.7</u>	<u>562.0</u>	<u>582.3</u>	626.8	601.3	602.7	623.1	642.9	619.4
C13HM	SN	<u>610.0</u>	<u>626.6</u>	<u>584.4</u>	<u>609.2</u>	<u>557.8</u>	<u>597.6</u>	<u>583.9</u>	<u>526.8</u>	<u>530.1</u>	<u>530.4</u>	<u>519.2</u>	<u>538.1</u>	574.6	563.1	559.0	578.1	607.5	576.5
	PPFD EW	<u>609.3</u>	<u>629.8</u>	<u>583.2</u>	<u>613.9</u>	<u>559.6</u>	<u>599.2</u>	<u>585.1</u>	<u>529.9</u>	<u>533.2</u>	<u>531.9</u>	<u>515.6</u>	<u>539.1</u>	570.4	560.8	557.6	574.5	604.6	573.6
C14HM	SN	<u>455.3</u>	<u>480.8</u>	<u>447.3</u>	<u>455.5</u>	<u>422.7</u>	<u>452.3</u>	<u>441.5</u>	<u>407.0</u>	<u>417.0</u>	<u>417.0</u>	<u>399.0</u>	<u>416.3</u>	441.3	443.4	433.0	432.9	467.5	443.6
	PPFD EW	<u>455.9</u>	<u>478.2</u>	<u>447.7</u>	<u>461.2</u>	<u>427.5</u>	<u>454.1</u>	<u>443.4</u>	<u>399.9</u>	<u>415.5</u>	<u>419.5</u>	<u>399.5</u>	<u>415.6</u>	437.0	441.2	431.5	429.3	464.5	440.7
C15HM	SN	<u>326.5</u>	<u>342.9</u>	<u>324.0</u>	<u>329.6</u>	<u>301.8</u>	<u>325.0</u>	<u>316.0</u>	<u>295.4</u>	<u>305.9</u>	<u>308.5</u>	<u>287.9</u>	<u>302.7</u>	321.4	323.0	320.6	318.2	340.5	324.7
	PPFD EW	<u>323.0</u>	<u>343.2</u>	<u>321.3</u>	<u>330.4</u>	<u>299.3</u>	<u>323.4</u>	<u>315.5</u>	<u>292.8</u>	<u>307.6</u>	<u>306.7</u>	<u>288.0</u>	<u>302.1</u>	317.9	321.2	319.3	314.9	338.0	322.2
C16HM	SN	<u>234.3</u>	<u>233.1</u>	<u>225.2</u>	<u>221.1</u>	<u>208.8</u>	<u>224.5</u>	<u>235.4</u>	<u>216.8</u>	<u>223.2</u>	<u>220.4</u>	<u>213.9</u>	<u>222.0</u>	231.1	218.1	226.4	224.8	230.3	226.1
	PPFD EW	<u>231.2</u>	<u>234.1</u>	<u>225.8</u>	<u>219.3</u>	<u>207.6</u>	<u>223.6</u>	<u>231.6</u>	<u>216.5</u>	<u>224.4</u>	<u>221.8</u>	<u>214.6</u>	<u>221.8</u>	228.2	216.5	225.5	222.1	228.2	224.1
C17HM	SN	<u>137.9</u>	<u>134.4</u>	<u>128.8</u>	<u>128.8</u>	<u>121.7</u>	<u>130.3</u>	<u>126.0</u>	<u>121.1</u>	<u>121.8</u>	<u>123.7</u>	<u>118.0</u>	<u>122.1</u>	132.3	125.3	122.9	130.2	128.5	127.8
	PPFD EW	<u>137.1</u>	<u>133.6</u>	<u>130.0</u>	<u>129.0</u>	<u>121.9</u>	<u>130.3</u>	<u>127.0</u>	<u>121.1</u>	<u>121.4</u>	<u>123.7</u>	<u>118.8</u>	<u>122.4</u>	129.9	123.8	122.0	128.2	126.9	126.2
C18HM	SN	<u>62.5</u>	<u>61.0</u>	<u>60.7</u>	<u>59.7</u>	<u>55.5</u>	<u>59.9</u>	<u>56.4</u>	<u>54.9</u>	<u>54.3</u>	<u>56.6</u>	<u>53.0</u>	<u>55.0</u>	61.6	57.9	56.7	60.4	58.8	59.1
	PPFD EW	<u>62.8</u>	<u>60.8</u>	<u>61.2</u>	<u>60.0</u>	<u>56.0</u>	<u>60.2</u>	<u>56.7</u>	<u>55.3</u>	<u>54.2</u>	<u>56.4</u>	<u>53.3</u>	<u>55.2</u>	60.4	57.1	56.3	59.3	57.9	58.2
CDM	SN	<u>337.8</u>	<u>342.7</u>	<u>323.6</u>	<u>331.5</u>	<u>307.3</u>	<u>328.6</u>	<u>315.7</u>	<u>293.8</u>	<u>292.5</u>	<u>294.2</u>	<u>286.4</u>	<u>296.5</u>	322.6	308.1	309.1	319.3	328.0	317.4
	PPFD EW	<u>337.2</u>	<u>342.8</u>	<u>324.9</u>	<u>332.7</u>	<u>307.5</u>	<u>329.0</u>	<u>316.2</u>	<u>293.5</u>	<u>293.4</u>	<u>294.1</u>	<u>286.9</u>	<u>296.8</u>	319.5	306.4	308.0	316.8	325.8	315.3

	RD	SCL-1	SCL-2	SCL-3	SCL-4	SCL-5	Mean	TT-1	TT-2	TT-3	TT-4	TT-5	Mean
C6HM	SN	<u>62.6</u>	<u>60.0</u>	<u>57.8</u>	<u>59.5</u>	<u>62.4</u>	<u>60.5</u>	<u>62.2</u>	<u>64.1</u>	<u>62.4</u>	<u>68.8</u>	65.1	<u>64.5</u>
	PPFD EW	<u>62.7</u>	<u>60.9</u>	<u>58.1</u>	<u>60.9</u>	<u>62.4</u>	<u>61.0</u>	<u>63.1</u>	<u>65.2</u>	<u>62.6</u>	<u>69.4</u>	64.9	<u>65.1</u>
C7HM	SN	<u>138.1</u>	<u>132.0</u>	<u>129.0</u>	<u>135.4</u>	<u>138.0</u>	<u>134.5</u>	<u>139.8</u>	<u>140.3</u>	<u>134.4</u>	<u>150.8</u>	144.1	<u>141.9</u>
	PPFD EW	<u>137.1</u>	<u>132.2</u>	<u>129.4</u>	<u>136.2</u>	<u>137.9</u>	<u>134.5</u>	<u>142.7</u>	<u>143.4</u>	<u>137.1</u>	<u>152.4</u>	144.0	<u>143.9</u>
C8HM	SN	<u>248.4</u>	<u>244.5</u>	<u>251.9</u>	<u>254.0</u>	<u>254.7</u>	<u>250.7</u>	<u>268.8</u>	<u>270.7</u>	<u>264.8</u>	<u>286.0</u>	269.2	<u>271.9</u>
	PPFD EW	<u>252.7</u>	<u>246.9</u>	<u>250.3</u>	<u>255.7</u>	<u>257.3</u>	<u>252.6</u>	<u>271.2</u>	<u>273.8</u>	<u>267.3</u>	<u>287.2</u>	269.0	<u>273.7</u>
C9HM	SN	<u>355.8</u>	<u>322.2</u>	<u>318.6</u>	<u>342.3</u>	<u>342.8</u>	<u>336.4</u>	<u>329.0</u>	<u>365.5</u>	<u>329.1</u>	<u>373.9</u>	362.4	<u>352.0</u>
	PPFD EW	<u>350.0</u>	<u>324.1</u>	<u>319.7</u>	<u>343.0</u>	<u>343.2</u>	<u>336.0</u>	<u>333.6</u>	<u>370.3</u>	<u>333.3</u>	<u>376.0</u>	362.2	<u>355.1</u>
C10HM	SN	<u>461.8</u>	<u>430.1</u>	<u>412.7</u>	<u>447.7</u>	<u>461.0</u>	<u>442.6</u>	<u>423.2</u>	<u>471.0</u>	<u>399.1</u>	<u>479.3</u>	451.7	<u>444.9</u>
	PPFD EW	<u>463.1</u>	<u>426.3</u>	<u>412.4</u>	<u>445.6</u>	<u>460.3</u>	<u>441.6</u>	<u>428.7</u>	<u>476.5</u>	<u>404.1</u>	<u>482.1</u>	451.4	<u>448.6</u>
C11HM	SN	<u>579.8</u>	<u>541.7</u>	<u>504.1</u>	<u>544.0</u>	<u>577.1</u>	<u>549.3</u>	<u>536.4</u>	<u>566.2</u>	<u>482.2</u>	<u>588.9</u>	524.2	<u>539.6</u>
	PPFD EW	<u>580.9</u>	<u>541.8</u>	<u>504.8</u>	<u>547.5</u>	<u>577.3</u>	<u>550.4</u>	<u>541.9</u>	<u>572.1</u>	<u>487.1</u>	<u>591.8</u>	524.0	<u>543.4</u>
C12HM	SN	<u>641.3</u>	<u>603.5</u>	<u>544.4</u>	<u>590.1</u>	<u>619.6</u>	<u>599.8</u>	<u>569.9</u>	<u>601.3</u>	<u>499.7</u>	<u>606.3</u>	<u>540.9</u>	<u>563.6</u>
	PPFD EW	<u>647.5</u>	<u>599.5</u>	<u>544.6</u>	<u>586.3</u>	<u>618.5</u>	<u>599.3</u>	<u>574.9</u>	<u>606.7</u>	<u>504.3</u>	<u>609.2</u>	<u>541.0</u>	<u>567.2</u>
C13HM	SN	<u>584.5</u>	<u>557.1</u>	<u>502.8</u>	<u>531.7</u>	<u>571.2</u>	<u>549.5</u>	<u>550.7</u>	<u>558.4</u>	<u>484.9</u>	<u>586.7</u>	512.4	<u>538.6</u>
	PPFD EW	<u>584.1</u>	<u>561.7</u>	<u>498.9</u>	<u>522.3</u>	<u>569.4</u>	<u>547.3</u>	<u>556.2</u>	<u>563.8</u>	<u>489.6</u>	<u>589.9</u>	512.2	<u>542.4</u>
C14HM	SN	<u>455.3</u>	<u>454.3</u>	<u>406.4</u>	<u>424.9</u>	<u>452.6</u>	<u>438.7</u>	<u>448.9</u>	<u>448.6</u>	<u>412.2</u>	<u>486.3</u>	442.3	<u>447.7</u>
	PPFD EW	<u>459.3</u>	<u>456.1</u>	<u>403.6</u>	<u>426.3</u>	<u>451.8</u>	<u>439.4</u>	<u>454.0</u>	<u>454.3</u>	<u>416.9</u>	<u>489.1</u>	441.9	<u>451.2</u>
C15HM	SN	<u>337.7</u>	<u>339.8</u>	<u>307.7</u>	<u>325.8</u>	<u>355.5</u>	<u>333.3</u>	<u>341.5</u>	<u>354.4</u>	<u>330.7</u>	<u>384.2</u>	348.8	<u>351.9</u>
	PPFD EW	<u>340.1</u>	<u>342.8</u>	<u>311.0</u>	<u>328.0</u>	<u>356.5</u>	<u>335.7</u>	<u>345.8</u>	<u>359.5</u>	<u>334.5</u>	<u>386.6</u>	348.4	<u>355.0</u>
C16HM	SN	<u>253.0</u>	<u>248.2</u>	<u>247.6</u>	<u>252.3</u>	<u>259.1</u>	<u>252.0</u>	<u>268.1</u>	<u>269.1</u>	<u>263.2</u>	<u>278.4</u>	263.5	<u>268.5</u>
	PPFD EW	<u>255.2</u>	<u>249.8</u>	<u>248.9</u>	<u>252.8</u>	<u>257.5</u>	<u>252.8</u>	<u>270.6</u>	<u>272.0</u>	<u>265.7</u>	<u>279.6</u>	263.2	<u>270.2</u>
C17HM	SN	<u>138.2</u>	<u>134.9</u>	<u>133.1</u>	<u>136.5</u>	<u>139.4</u>	<u>136.4</u>	<u>134.2</u>	<u>140.5</u>	<u>134.0</u>	<u>149.0</u>	<u>145.3</u>	<u>140.6</u>
	PPFD EW	<u>140.5</u>	<u>133.4</u>	<u>131.4</u>	<u>135.0</u>	<u>139.0</u>	<u>135.9</u>	<u>137.0</u>	<u>143.7</u>	<u>136.8</u>	<u>150.6</u>	<u>145.4</u>	<u>142.7</u>
C18HM	SN	<u>62.5</u>	<u>60.6</u>	<u>58.0</u>	<u>61.4</u>	<u>62.4</u>	<u>61.0</u>	<u>61.3</u>	<u>63.5</u>	<u>62.3</u>	<u>68.1</u>	64.8	<u>64.0</u>
	PPFD EW	<u>62.4</u>	<u>60.8</u>	<u>57.9</u>	<u>60.9</u>	<u>62.6</u>	<u>60.9</u>	<u>62.8</u>	<u>65.2</u>	<u>63.6</u>	<u>69.0</u>	64.8	<u>65.1</u>
CDM	SN	<u>332.2</u>	<u>317.6</u>	<u>298.0</u>	<u>315.8</u>	<u>330.4</u>	<u>318.8</u>	<u>318.0</u>	<u>331.8</u>	<u>296.9</u>	<u>346.7</u>	318.1	<u>322.3</u>
	PPFD EW	<u>333.5</u>	<u>318.2</u>	<u>297.8</u>	<u>315.4</u>	<u>330.3</u>	<u>319.0</u>	<u>321.7</u>	<u>335.9</u>	<u>300.2</u>	<		

Table 4. Comparisons of hourly mean leaf PPFD (HMPPFD) between south-north row (SN) and east-west row (EW) of the five trees per training system (Table 1) on an overcast day in the end of July (15 year of tree age). The underlines indicate cases that the PPFD value of east-west row was larger than that of south-north.

	RD <sup>2</sup>	OC-1	OC-2	OC-3	OC-4	OC-5	Mean	MCL-1	MCL-2	MCL-3	MCL-4	MCL-5	Mean	YS-1	YS-2	YS-3	YS-4	YS-5	Mean
O6HM	SN	<u>37.0</u>	<u>36.1</u>	<u>35.7</u>	<u>35.3</u>	<u>32.6</u>	<u>35.3</u>	<u>32.5</u>	<u>32.8</u>	<u>31.8</u>	<u>32.7</u>	<u>31.7</u>	<u>32.3</u>	37.3	34.0	<u>33.5</u>	<u>36.1</u>	<u>34.5</u>	<u>35.1</u>
	PPFD EW	<u>38.2</u>	<u>37.0</u>	<u>36.8</u>	<u>36.5</u>	<u>33.5</u>	<u>36.4</u>	<u>33.8</u>	<u>33.6</u>	<u>33.0</u>	<u>34.2</u>	<u>32.2</u>	<u>33.4</u>	37.1	34.7	<u>34.0</u>	<u>36.8</u>	<u>34.8</u>	<u>35.5</u>
O7HM	SN	<u>109.9</u>	111.6	<u>108.8</u>	<u>110.2</u>	<u>101.7</u>	<u>108.4</u>	102.0	<u>100.4</u>	<u>97.7</u>	<u>103.6</u>	98.5	<u>100.5</u>	115.8	108.1	101.5	111.8	110.8	109.6
	PPFD EW	<u>110.1</u>	111.4	<u>109.9</u>	<u>110.5</u>	<u>101.9</u>	<u>108.8</u>	101.9	<u>100.5</u>	<u>97.9</u>	<u>103.7</u>	99.3	<u>100.7</u>	113.2	106.5	100.6	109.9	109.0	107.9
O8HM	SN	<u>129.9</u>	127.7	<u>130.1</u>	129.8	<u>117.5</u>	<u>127.0</u>	<u>115.8</u>	<u>115.6</u>	114.8	123.8	<u>117.0</u>	<u>117.4</u>	138.2	127.1	120.2	130.0	129.3	129.0
	PPFD EW	<u>130.4</u>	127.4	<u>131.4</u>	129.6	<u>118.1</u>	<u>127.4</u>	<u>116.2</u>	<u>116.0</u>	114.4	123.7	<u>117.9</u>	<u>117.6</u>	135.0	125.6	119.4	128.4	127.5	127.2
O9HM	SN	<u>125.9</u>	120.7	<u>128.2</u>	<u>122.4</u>	<u>111.8</u>	<u>121.8</u>	<u>117.4</u>	<u>114.8</u>	<u>118.7</u>	123.1	<u>120.6</u>	<u>118.9</u>	131.9	128.9	121.6	132.1	132.0	129.3
	PPFD EW	<u>126.6</u>	120.3	<u>129.7</u>	<u>123.4</u>	<u>112.3</u>	<u>122.5</u>	<u>117.8</u>	<u>115.4</u>	<u>119.2</u>	122.9	<u>121.7</u>	<u>119.4</u>	128.9	127.3	120.6	129.5	129.8	127.2
O10HM	SN	<u>152.3</u>	146.0	<u>154.1</u>	<u>148.9</u>	<u>138.6</u>	<u>148.0</u>	<u>145.6</u>	<u>141.5</u>	145.2	148.1	<u>143.7</u>	<u>144.8</u>	162.2	156.2	149.2	156.5	160.2	156.9
	PPFD EW	<u>152.6</u>	145.4	<u>155.6</u>	<u>149.3</u>	<u>139.3</u>	<u>148.5</u>	<u>145.9</u>	<u>141.9</u>	145.2	148.0	<u>144.6</u>	<u>145.1</u>	158.4	154.0	147.6	153.2	157.4	154.1
O11HM	SN	<u>220.4</u>	211.8	<u>224.2</u>	<u>215.6</u>	<u>201.6</u>	<u>214.7</u>	211.6	<u>206.2</u>	<u>210.2</u>	215.1	<u>206.6</u>	<u>209.9</u>	235.1	224.8	217.4	226.6	232.4	227.3
	PPFD EW	<u>221.7</u>	211.2	<u>226.5</u>	<u>216.0</u>	<u>201.9</u>	<u>215.5</u>	211.5	<u>207.1</u>	<u>211.1</u>	214.5	<u>208.8</u>	<u>210.6</u>	229.5	221.4	215.2	221.7	228.2	223.2
O12HM	SN	<u>240.9</u>	231.9	<u>244.6</u>	<u>239.9</u>	<u>220.8</u>	<u>235.6</u>	<u>224.0</u>	<u>221.9</u>	228.6	<u>236.2</u>	<u>227.0</u>	<u>227.5</u>	260.5	243.7	237.3	249.9	255.2	249.3
	PPFD EW	<u>241.5</u>	231.2	<u>247.2</u>	<u>240.0</u>	<u>221.7</u>	<u>236.3</u>	<u>224.9</u>	<u>223.0</u>	228.5	<u>236.5</u>	<u>228.0</u>	<u>228.2</u>	254.1	240.2	234.8	244.5	250.6	244.8
O13HM	SN	<u>221.5</u>	211.5	<u>220.5</u>	<u>218.0</u>	<u>202.6</u>	<u>214.8</u>	<u>203.1</u>	<u>203.2</u>	206.8	<u>212.0</u>	<u>204.8</u>	<u>206.0</u>	237.2	221.2	215.2	227.8	229.5	226.2
	PPFD EW	<u>222.2</u>	212.0	<u>222.8</u>	<u>219.2</u>	<u>203.5</u>	<u>215.9</u>	<u>204.1</u>	<u>204.4</u>	<u>207.8</u>	<u>212.2</u>	<u>205.6</u>	<u>206.8</u>	231.4	217.9	213.3	222.8	225.3	222.1
O14HM	SN	<u>155.7</u>	144.9	<u>150.1</u>	<u>149.9</u>	<u>140.6</u>	<u>148.2</u>	141.6	<u>140.9</u>	139.6	<u>144.1</u>	<u>140.5</u>	<u>141.3</u>	163.8	149.6	147.0	159.5	155.4	155.1
	PPFD EW	<u>156.3</u>	144.0	<u>151.4</u>	<u>150.5</u>	<u>141.2</u>	<u>148.7</u>	141.3	<u>142.0</u>	139.2	<u>144.3</u>	<u>142.0</u>	<u>141.8</u>	159.9	147.5	145.7	155.8	152.7	152.3
O15HM	SN	<u>132.3</u>	117.4	<u>122.2</u>	<u>121.9</u>	<u>116.8</u>	<u>122.1</u>	117.4	<u>114.8</u>	111.9	<u>115.7</u>	<u>116.5</u>	<u>115.3</u>	134.8	120.1	119.0	130.5	124.1	125.7
	PPFD EW	<u>133.1</u>	117.1	<u>123.4</u>	<u>122.0</u>	<u>117.4</u>	<u>122.6</u>	117.3	<u>115.1</u>	111.6	<u>116.5</u>	<u>117.0</u>	<u>115.5</u>	131.8	118.7	117.9	127.6	122.0	123.6
O16HM	SN	<u>135.5</u>	127.6	<u>121.1</u>	131.3	<u>118.9</u>	<u>126.9</u>	<u>120.5</u>	115.2	<u>112.8</u>	113.1	<u>112.9</u>	<u>114.9</u>	134.0	131.2	114.0	134.1	132.2	129.1
	PPFD EW	<u>136.0</u>	127.1	<u>121.9</u>	131.1	<u>119.0</u>	<u>127.0</u>	<u>120.6</u>	115.0	<u>112.9</u>	113.1	<u>113.2</u>	<u>115.0</u>	131.0	129.5	113.1	131.4	130.0	127.0
O17HM	SN	<u>113.4</u>	110.2	<u>103.1</u>	110.7	<u>100.3</u>	<u>107.5</u>	<u>101.2</u>	<u>98.5</u>	<u>100.4</u>	104.6	<u>99.7</u>	<u>100.9</u>	114.7	107.9	101.4	111.2	110.7	109.2
	PPFD EW	<u>113.6</u>	109.5	<u>104.2</u>	110.7	<u>100.7</u>	<u>107.7</u>	<u>101.3</u>	<u>99.0</u>	<u>100.6</u>	104.1	<u>100.1</u>	<u>101.0</u>	112.2	106.4	100.5	108.9	109.0	107.4
O18HM	SN	<u>38.0</u>	37.2	<u>36.8</u>	<u>36.8</u>	<u>33.5</u>	36.5	34.0	<u>33.2</u>	33.1	34.7	<u>31.6</u>	<u>33.3</u>	37.7	35.6	34.7	37.0	35.9	36.2
	PPFD EW	<u>38.1</u>	37.1	<u>37.0</u>	<u>36.9</u>	<u>33.6</u>	36.5	34.0	<u>33.3</u>	33.1	34.7	<u>31.8</u>	<u>33.4</u>	36.9	35.2	34.4	36.3	35.4	35.6
ODM	SN	<u>139.4</u>	133.4	<u>136.9</u>	<u>136.2</u>	<u>125.9</u>	<u>134.4</u>	<u>128.2</u>	<u>126.1</u>	<u>127.0</u>	<u>131.3</u>	<u>127.0</u>	<u>127.9</u>	146.4	137.6	131.7	141.8	141.7	139.8
	PPFD EW	<u>140.0</u>	133.1	<u>138.3</u>	<u>136.6</u>	<u>126.5</u>	<u>134.9</u>	<u>128.5</u>	<u>126.6</u>	<u>127.3</u>	<u>131.4</u>	<u>127.9</u>	<u>128.3</u>	143.0	135.8	130.5	139.0	139.4	137.5

	RD	SCL-1	SCL-2	SCL-3	SCL-4	SCL-5	Mean	TT-1	TT-2	TT-3	TT-4	TT-5	Mean
O6HM	SN	<u>37.7</u>	<u>36.2</u>	<u>34.5</u>	<u>35.7</u>	<u>37.2</u>	<u>36.2</u>	<u>37.0</u>	37.8	37.6	40.9	39.9	38.6
	PPFD EW	<u>38.3</u>	<u>37.3</u>	<u>35.0</u>	<u>37.7</u>	<u>37.4</u>	<u>37.1</u>	<u>37.1</u>	37.7	36.5	40.2	39.4	38.2
O7HM	SN	<u>111.8</u>	108.9	105.1	104.1	112.9	108.5	<u>101.9</u>	<u>107.8</u>	<u>105.4</u>	<u>103.3</u>	<u>108.9</u>	<u>105.5</u>
	PPFD EW	<u>112.2</u>	108.3	104.6	104.0	112.9	108.4	<u>105.0</u>	<u>111.0</u>	<u>108.3</u>	<u>105.0</u>	<u>109.0</u>	<u>107.7</u>
O8HM	SN	<u>129.2</u>	124.8	118.7	120.5	128.4	124.3	<u>109.0</u>	<u>121.8</u>	<u>113.0</u>	<u>116.2</u>	120.5	<u>116.1</u>
	PPFD EW	<u>129.7</u>	124.8	118.1	119.9	128.1	124.1	<u>111.8</u>	<u>125.0</u>	<u>115.8</u>	<u>117.5</u>	120.3	<u>118.1</u>
O9HM	SN	131.1	133.7	124.9	125.6	134.8	130.0	<u>138.8</u>	<u>134.3</u>	<u>140.2</u>	<u>145.1</u>	137.2	<u>139.1</u>
	PPFD EW	131.1	133.3	124.6	125.3	134.5	129.7	<u>142.8</u>	<u>138.4</u>	<u>143.9</u>	<u>146.9</u>	136.9	<u>141.8</u>
O10HM	SN	<u>165.7</u>	165.8	159.4	161.0	<u>169.3</u>	164.2	<u>171.8</u>	<u>170.9</u>	<u>178.8</u>	<u>186.8</u>	184.8	<u>178.6</u>
	PPFD EW	<u>166.5</u>	165.2	157.9	159.6	<u>169.5</u>	163.7	<u>177.0</u>	<u>176.4</u>	<u>183.5</u>	<u>189.6</u>	184.3	<u>182.2</u>
O11HM	SN	<u>242.9</u>	243.7	235.4	<u>244.2</u>	247.7	242.8	<u>245.7</u>	<u>253.8</u>	<u>264.9</u>	<u>275.7</u>	279.3	<u>263.9</u>
	PPFD EW	<u>243.6</u>	243.0	234.4	<u>245.5</u>	246.3	242.5	<u>253.7</u>	<u>261.9</u>	<u>271.4</u>	<u>279.9</u>	279.3	<u>269.2</u>
O12HM	SN	<u>260.1</u>	260.1	253.9	269.7	<u>274.3</u>	263.6	<u>268.5</u>	<u>280.8</u>	<u>299.2</u>	<u>310.5</u>	<u>312.2</u>	<u>294.2</u>
	PPFD EW	<u>260.5</u>	259.1	251.7	268.8	<u>275.6</u>	263.1	<u>276.6</u>	<u>289.6</u>	<u>306.8</u>	<u>315.1</u>	<u>312.3</u>	<u>300.1</u>
O13HM	SN	240.6	<u>237.4</u>	235.6	252.7	<u>248.1</u>	242.9	<u>243.3</u>	<u>258.1</u>	<u>261.1</u>	<u>276.2</u>	280.3	<u>263.8</u>
	PPFD EW	240.6	<u>237.8</u>	234.1	252.2	<u>248.6</u>	242.7	<u>250.6</u>	<u>266.7</u>	<u>267.7</u>	<u>280.4</u>	279.9	<u>269.1</u>
O14HM	SN	<u>168.8</u>	<u>157.8</u>	158.5	173.3	171.7	166.0	<u>165.9</u>	<u>176.9</u>	<u>176.3</u>	<u>185.5</u>	184.8	<u>177.9</u>
	PPFD EW	<u>169.3</u>	<u>158.3</u>	158.1	172.8	171.3	165.9	<u>171.0</u>	<u>182.7</u>	<u>180.8</u>	<u>188.3</u>	184.8	<u>181.5</u>
O15HM	SN	<u>137.0</u>	<u>125.2</u>	128.8	138.3	135.7	133.0	<u>128.2</u>	<u>138.7</u>	<u>137.0</u>	<u>138.2</u>	139.9	<u>136.4</u>
	PPFD EW	<u>138.1</u>	<u>125.4</u>	128.3	138.1	135.2	133.0	<u>132.1</u>	<u>143.0</u>	<u>140.2</u>	<u>140.2</u>	139.4	<u>139.0</u>
O16HM	SN	135.4	<u>123.9</u>	127.9	121.6	131.2	128.0	<u>98.4</u>	<u>122.6</u>	<u>113.9</u>	<u>118.1</u>	129.1	<u>116.4</u>
	PPFD EW	135.1	<u>124.0</u>	127.3	121.0	131.0	127.7	<u>101.3</u>	<u>125.8</u>	<u>116.7</u>	<u>119.4</u>	128.6	<u>118.4</u>
O17HM	SN	117.4	111.1	107.8	105.4	115.4	111.4	<u>97.2</u>	<u>109.8</u>	<u>105.6</u>	<u>106.2</u>	110.3	<u>105.8</u>
	PPFD EW	117.1	110.4	107.5	105.4	114.6	111.0	<u>100.2</u>	<u>113.3</u>	<u>108.5</u>	<u>107.9</u>	110.3	<u>108.0</u>
O18HM	SN	<u>37.9</u>	37.2	35.1	37.7	37.6	37.1	<u>35.7</u>	<u>37.4</u>	<u>36.9</u>	<u>40.3</u>	38.7	<u>37.8</u>
	PPFD EW	<u>38.3</u>	37.1	34.8	37.7	37.6	37.1	<u>36.7</u>	<u>38.4</u>	<u>37.8</u>	<u>40.9</u>	38.7	<u>38.5</u>
ODM	SN	<u>147.4</u>	143.5	140.4	145.4	149.6	145.2	<u>141.7</u>	<u>150.0</u>	<u>151.5</u>	<u>157.1</u>	158.9	<u>151.9</u>
	PPFD EW	<u>147.7</u>	143.4	139.7	145.2	149.4	145.1	<u>145.8</u>	<u>154.6</u>	<u>155.2</u>	<u>159.3</u>	158.7	<u>154.7</u>

<sup>2</sup>Row direction.

普通栽培（第24図左）と計画的密植栽培（第24図右）の間で7月下旬1日分のDMPNOを20年間合計し、比較した（第5表）。その結果、DMPNO合計値は晴天で約15%、曇天で約20%ほど、計画的密植栽培の方が普通栽培より大きかった（第5表）。

## 考 察

### 1. モデル手法のメリット

本モデル手法のメリットは、以下に列举したように、限りなく不可能な実測定の代用を果たすことである。

通常の果樹園においては、同一仕立て方法でも樹冠形や葉量に相当変異がある。これらを放置したまま本研究と同等な実験を行えば、これらは大きな誤差源になる。一方、樹冠形や葉量をコントロールしながら多くの樹を育成することは不可能であろう。樹は大きく、葉数も膨大なため、多数の樹の樹冠形状値や葉量を計測することは容易でない。ちなみに、葉面積指数の実測定（Jackson,

1968；塩崎・菊池, 1988）は簡単でなく、その間接的計測法には精度の問題もある（浅田, 1989；鈴木, 1964）。したがって、葉面積指数の把握とそのコントロールは難しく、本研究の遂行にとって不可欠な条件を維持できない。樹にグリッドを組み、この中で行う様々な計測（Jackson, 1968；倉橋, 1997；小野, 1985）は大変な作業であり、計測樹数も限られ、果樹園全体の計測も無理と言えよう。大抵、物理的制約からグリッドの網目は相当粗くなり、精度の高い実験は期待できない。ましてや、多数の果樹園を対象に、長年にわたる実測定は不可能であると断言できる。以上のことから、本研究におけるCACOASの機能と同等な調査を実際の樹を用いて行うことは事実上不可能である。

樹冠内光要因の調査研究では、光センサーを空間あるいは地面に水平に置いた状態で計測がなされている（Richard・Barden, 1982；Lakso・Musselman, 1976；荒川ら, 1999；黒田・千葉, 2002）。しかし、光合成作用に最も強く関与する光要因は葉面受光強度である。葉面受

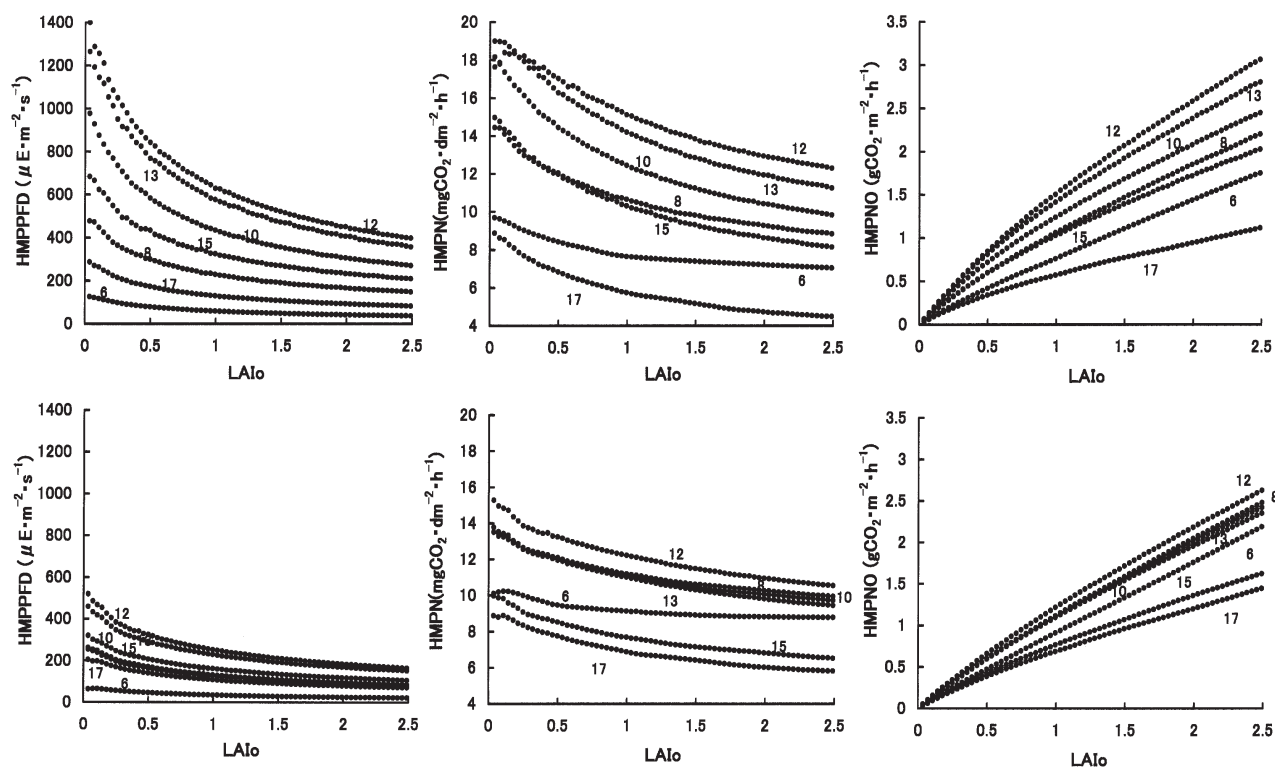


Fig.15 Relations between LAI per orchard (LAIo) of the OC-1 tree (15 year of tree age) and hourly mean leaf PPFD (HMPFPD, left), hourly mean Pn (HMPN, middle) or hourly mean Pn per orchard (HMPNO, right) on a clear day (upper) and an overcast day (lower) in the end of July. The numerals indicate hours in daytime.



光強度は葉面の傾斜角度によって大きく変化する。このため、OLEAS内では、品種特有な葉面傾斜角度確率密度分布（山本ら, 2009）を用いたモンテカルロシミュレーション法により葉面傾斜角度を発生させ（方位角度は均一分布）、樹冠内全葉の葉面 PPFD を計算した（山本, 1999）。ところで、樹冠内全葉を対象に個々の葉面に沿った受光強度の測定は可能であろうか。日中、時刻が1時間経過する間に太陽方位角度は15度変化し、太陽高度も相当変化する。よって、この間、同一葉でも葉面受光強度は大きく変化する、日向日陰も入れ替わる。敏速な測定装置を用いても短時間内に葉面受光強度を測定できる葉数は限られ（山本, 1988）、幼木の場合を除いて数千数万枚にも及ぶ成木全葉の計測は物理的に不可能になる。計測時間を延長すれば太陽高度や太陽方位の変化による影響はさらに大きくなり、計測結果が不正確になる。

全葉測定が無理となれば、抽出測定法に頼るしかない。

研究目的、計測方法の違いがあったものの、樹冠内光要因（光条件）の測定に抽出測定法を用いた例は非常に多い（Heinicke, 1969；Richard・Barden, 1982；Lakso・Musselman, 1976；荒川ら, 1999；黒田・千葉, 2002；小野, 1985）。しかし、第2図に示したように、樹冠内全葉の葉面 PPFD 分布は晴天、曇天とも正規分布形から著しくかけ離れていた。よって、この母集団から一定数を抽出して得る標本平均値は母平均値から大きく外れる。計測部位が葉面、空間、地面を問わず、このことが当てはまるので特に注意すべきであろう。さらに計測方法上の混乱を引き起こしたのは、上記研究の多くで、抽出測定と深く結びついて、樹冠外投射光の水平面強度と樹冠内水平面光強度を用いて算出した相対的受光強度（光補足率, light interception (%)）の使用であった。そもそも light interception (%) は植物群落生産構造図（Monsi・Saeki, 1953）中の一つの要素であり、その垂

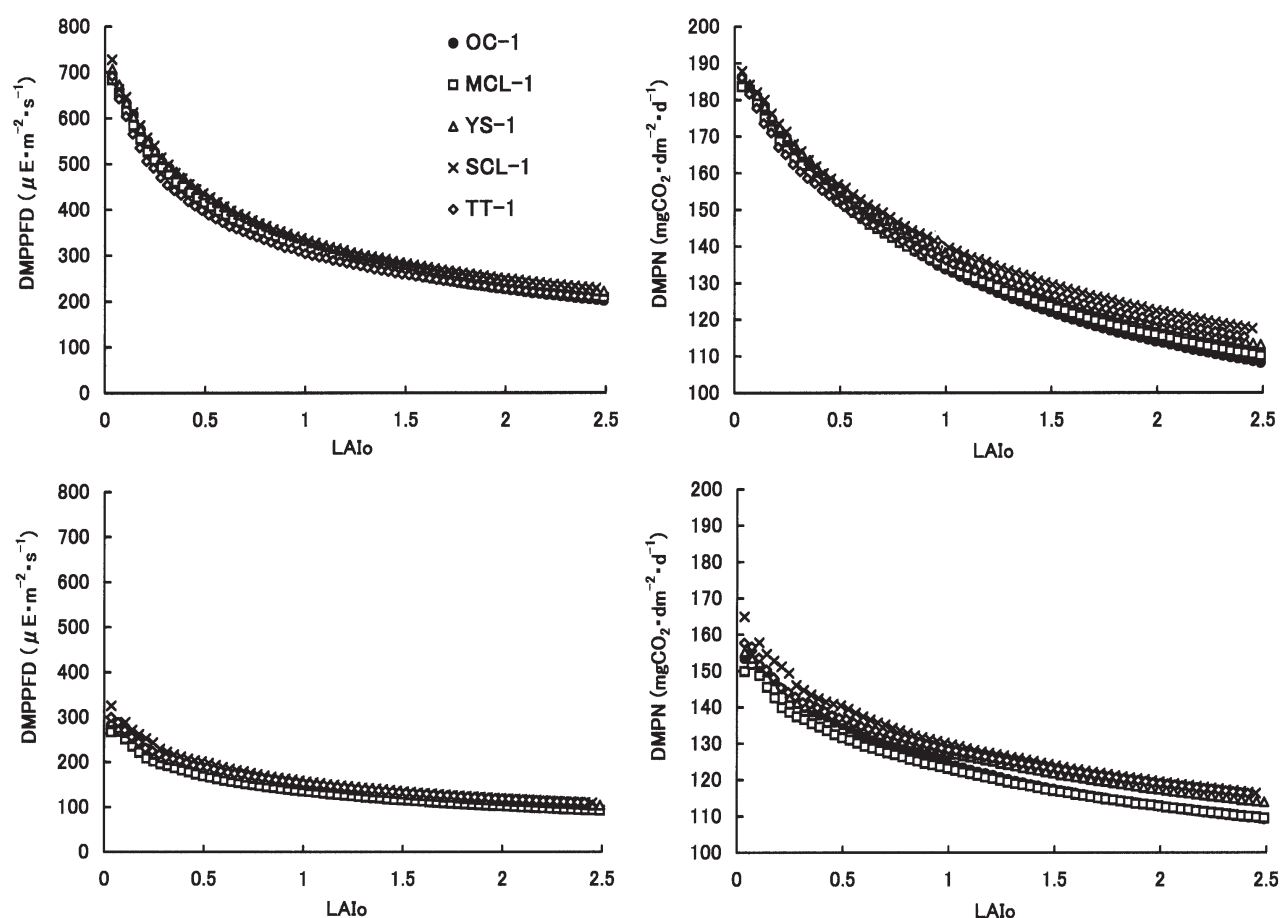


Fig.16 Relations between LAI per orchard (LAIo) of the five trees (15 year of tree age) and daily mean leaf PPFD (DMPPFD, left) or daily mean Pn (DMPN, right) on a clear day (upper) and an overcast day (lower) in the end of July.

直分布曲線から吸光係数（減衰係数とも言う）を算出し、群落光合成モデルへ繋ぐ役割を担っていたにすぎない。しかも、Monsi・Saekiモデルは、葉量が水平方向に均一分布する植物群落、曇天下、葉の傾斜角度が一定値の場合に成立したものであり、離散型分布、不定形立体、葉量の三次元的不均一分布などの特徴が顕著になる果樹群落を対象にすることができない（山本, 1999）。

以上の諸点から、本研究におけるOLEASの機能と同等な調査を実際の樹を用いて行うことは事実上不可能であると考えられる。

果樹の光合成研究例は数多いが、そのほとんどが個葉（天野ら, 1972）あるいは樹体の一部（Johnson・Lakso, 1986）を用いたもので、果樹園全体を対象にした光合成測定例は存在しない。樹体まるごと収納する大型同化箱法を用いても、実験目的や実験条件に大きな制約があり、本研究と同等な調査は困難であろう。したがって、本報

に記したCACOASとOLEASを用いて園内多数の樹冠における全葉の葉面PPFDを推定し、これにPnの重回帰推定式を組み合わせた手法は、重回帰推定式の信頼性が関係するものの、全く新しい方法で、本研究目的に照らして有効な方法であると思われる。なお、Pnの重回帰推定式の決定係数は約67%であったものの、残り約33%の変動の多くは測定葉の個体差、装置使用の際の測定誤差などの偶然誤差であることを考慮すると十分信頼性があると考えられる（奥野ら, 1974）。クロロフィル含量（SPAD値）、葉厚、葉の水ポテンシャル、気孔拡散抵抗、葉内外の炭酸ガス濃度差、葉温などの要因を説明変数に用いた場合、決定係数は上記より約13%上昇した（山本ら, 1995）。しかし、これらを説明変数に使用することは本シミュレーションの性格とその目的から外れる。

ところで、結果の2.に記した5月中旬の朝夕における推定Pnの異常値発生原因として以下のことが考えられる。

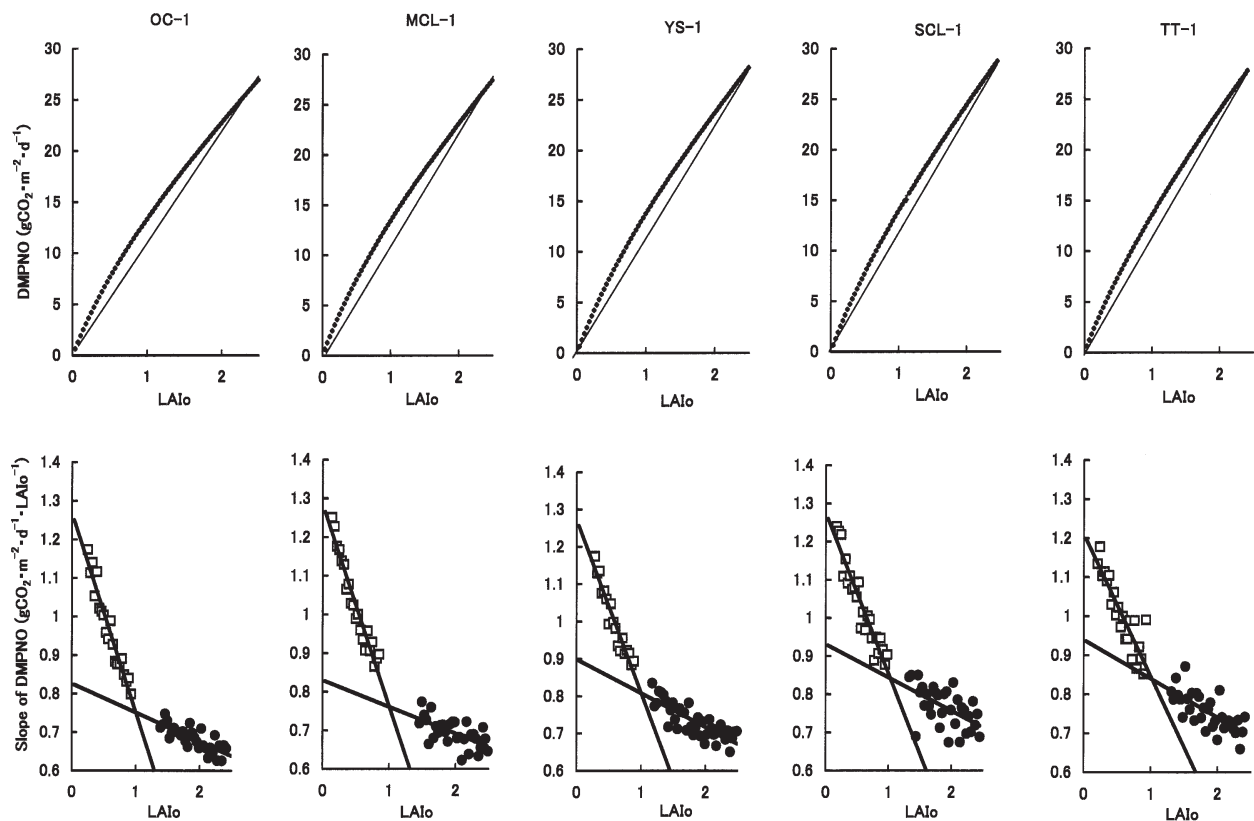


Fig.17 The upper part shows relations between LAI per orchard (LAIo) and daily mean Pn per orchard (DMPNO) of the five trees (15 year of tree age) on a clear day in the end of July. The lower part shows relations between the slope of DMPNO per LAIo of two data-groups and the LAIo.

この発生が5月中旬の朝夕および主に葉面PPFDの小さい領域に限定された。おそらく、推定時期（5月中旬）が重回帰推定式作成用データを入力した実験期間の境界付近に当たったため、上記境界付近の展葉後日数に対する偏回帰係数の信頼度、非常に小さい葉面PPFD、早朝の気象条件などが重なり、負の推定値になったものと考えられる。

果樹園光環境の研究にモデル手法を用いた例として、木製円錐体を並べた物理モデル（Ferguson, 1960）およびヘッジロー外形を幾何学的図形に単純化した数学モデル（Palmer, 1977；Charles-Edward・Thorpe, 1976）がある。上記研究対象が果樹園レベルであった点かつモデルを用いた点では本研究に類似していた。だが、樹冠形に関する極度の単純化が行われた一方、葉分布などの樹冠の内部構造は全く扱われていない。しかも、この場合にもlight interception（%）が推定計算され、当然ながら葉面受光強度分布データを欠いていた。したがって、これらは本研究の目的・内容とは大きくかけ離れたもの

と考えられる。また、トレリス型果樹園の光環境解析に上記同様なモデル手法を用い、さらに果樹園の光合成ポテンシャルまで言及した研究（Denholm・Conner, 1982）があるが、これに対しても上記同様な問題点を指摘したい。

## 2. 果樹園の光環境と光合成における天候要因、時刻要因、季節要因および樹齢要因

1. の実験結果から算出すると、晴天日13時刻の全投射PPFDに対する曇天日のそれは約38%であった（第2表）。一方、晴天日の平均純光合成速度に対する曇天日のそれは約78%であった（第6図）。この違いの原因として、光合成作用の光飽和現象のほかに、Pn重回帰推定式に用いられた気温やVPDの両天候間の違い（第2表）も作用したことが考えられる。正午付近の葉面PPFDと個葉Pnの関係（第7図）に見られたように、7月下旬における晴天日の高温乾燥条件に比べて、曇天日の中程度の気温と空気中湿度の上昇が光合成に有利に働いたもの

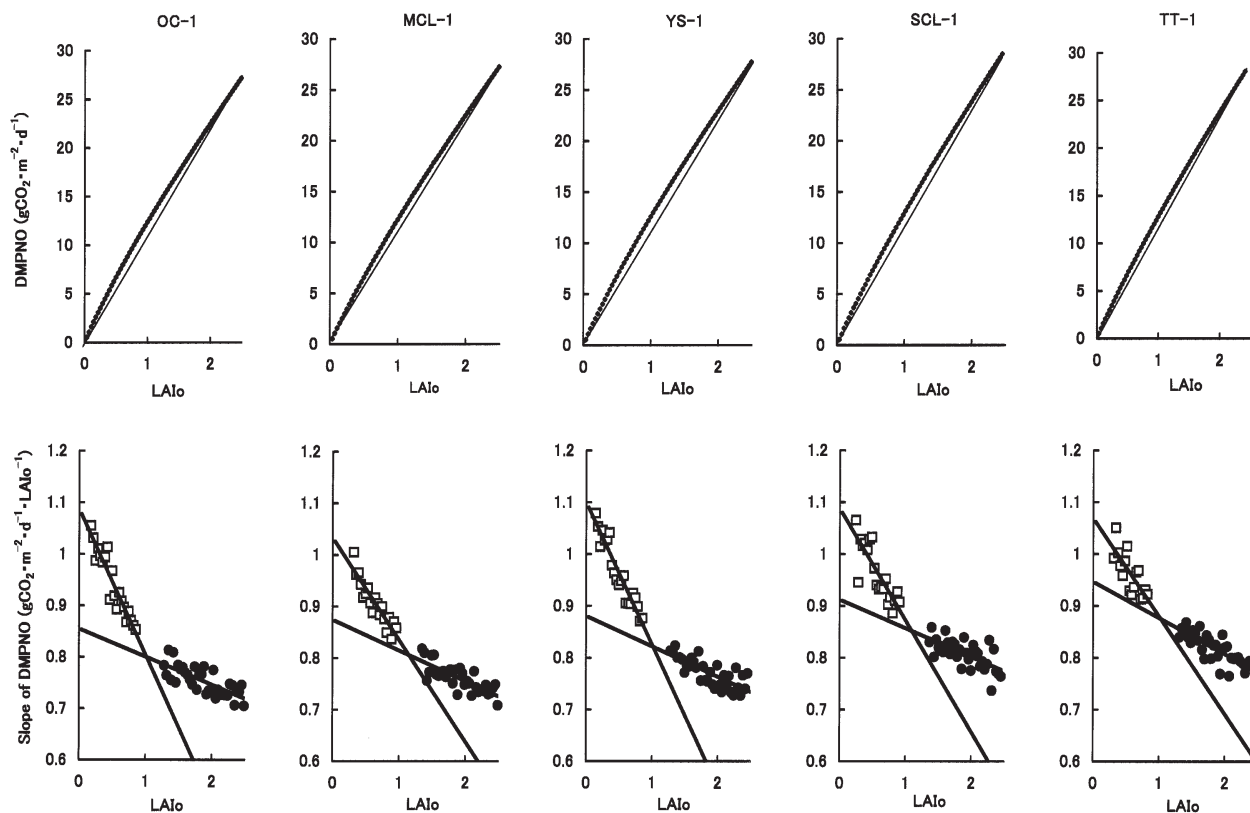


Fig.18 The upper part shows relations between LAI per orchard (LAIo) and daily mean Pn per orchard (DMPNO) of the five trees (15 year of tree age) on an overcast day in the end of July. The lower part shows relations between the slope of DMPNO per LAIo of two data-groups and the LAIo.

と考えられる。このほか、第2表に見られたように、天空からの散乱光強度は曇天日の方が総じて大きかったため、曇天日における樹冠日陰部の光環境が晴天日より勝ったものと考えられる (Lakso・Musselman, 1976)。上記数値の違いだけでなく、葉面PPFDとPnの分布形が晴天と曇天で大きく異なった (第2図、第3図、第4図および第5図)。生育期間の曇天日数の多さを考慮すると、果樹の物質生産を評価する際の天候条件としては、晴天と曇天、いずれも欠かせず、片方で代用できないものと考えられる。

第6図から算出すると、朝 (6~8時) と夕 (16~18時) の園地純光合成速度は1日分の約32%にも達し、朝夕の光合成産物は物質生産上無視できない。また、HMPNの経時的変化形はHMPPFDのそれとは異なり、午前と午後の間で非対称であった (第6図)。この原因として、気温や相対湿度が朝と夕の間に大きく異なったためであると考えられる (第2表)。よって、限られた時刻の計測値だけで光環境や光合成を比較することは、1. に記した

抽出測定法と同じ弊害をもたらすものと考えられる。

春から夏にかけて、光環境は急速に悪化した。果樹園の純光合成速度は6月下旬~7月下旬に最大になった (第10図)。この時期は葉量がほぼプラトーに達し、物質生産の最盛期であることがシミュレーション実験で確認できたと言えよう。Barden (1978) はリンゴ個葉の光合成能は、葉面積が最大に到達する数日後にピークに到達することを報告した。一方、果樹園内光環境はこの時期一層悪化し (第10図左)、果実肥大最盛期にも当たることから、同化産物の競合が最も起き易い (Yamamoto, 2001) 時期であると考えられる。これ以降の8月下旬と9月下旬、樹冠の形状変化は少なかったが、投射光の減少も加わり、純光合成速度も減少し、物質生産が次第に減退する期間と考えられる。そして、収穫期 (10月下旬) は投射光が一層減少し、葉の老化も重なり、物質生産の終息時期であると考えられる。春季 (5月中旬と6月上旬) の樹冠は相当明るかったことから、春季に光環境が悪化することは通常考えられない。葉量が少なく、純光合成

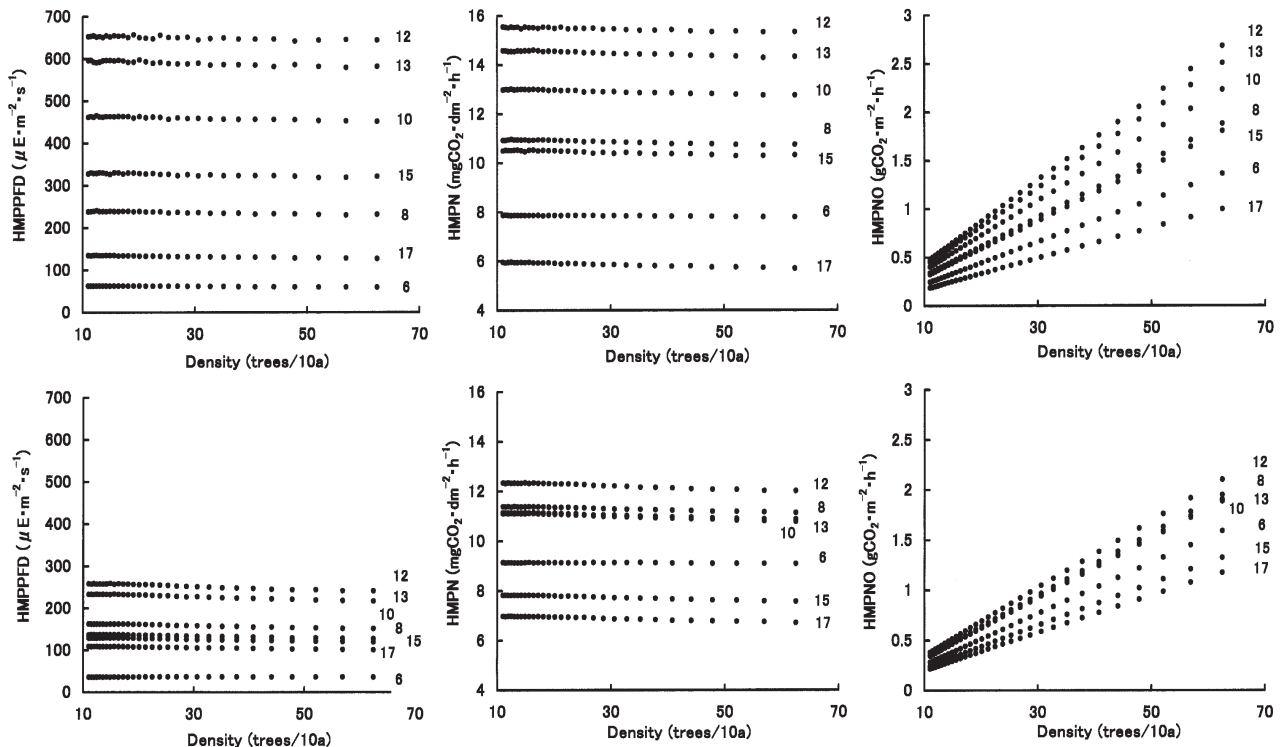


Fig.19 Relations between planting densities in four square planting of the OC-1 tree (15 year of tree age) and hourly mean leaf PPFD (HMPPFD, left), hourly mean Pn (HMPN, middle) or hourly mean Pn per orchard (HMPNO, right) on a clear day (upper) and an overcast day (lower) in the end of July. The numerals indicate hours in daytime.

速度も低かったため、恵まれた光環境下でありながら、物質生産活動を十分発揮できない期間であると考えられる（第10図）。

CACOAS出力の経年的変化（第12図）から以下のことが推察された。すなわち、樹齢9年以前は割り当て空間に抵触する頻度が低く、剪定処理はLAIaの調整範囲に留まり、太枝も含む枝の切除はあまり多くなかった。そのためか、樹齢9～10年頃に樹冠容積や樹高などに最大値が現れたものと考えられる（第12図）。また、第13図および第14図から、樹齢が低いと光環境や園地純光合成速度の変化が大きく、樹齢が高くなるとこれらの大きな変化は目立たなくなることが推察された。樹齢10年以降、樹冠が拡大すれば、割り当て空間に絶えず抵触し、太枝も含めた枝の切除が多くなり、樹冠容積や樹高などの数値は幾分減少した一方（第12図）、光環境や園地純光合成速度は設定LAIaおよび設定園地LAI（LAIo）に対応して変化したものと考えられる（第13図）。よって、光環境や園地純光合成速度を比較するに当たり、これら

が安定期に入った樹齢に絞ることが無難と言えよう。

樹齢1年における晴天日のHMPPFD（したがってHMPN）が、樹齢2年より小さかった（第13図および第14図）理由として、樹齢1年の主幹（新梢に相当）と樹齢2年以降の新梢に着生する葉の重なり方や姿勢の違いがあり、葉数が少ないことも加わり、OLEASが敏感に反応した結果であると考えられる。

### 3. 園地LAIの影響に関する考察

第15図および第16図に示したように、樹の着生葉量、したがって園地LAIの増大により、晴天日、曇天日も光環境が悪化し、葉の純光合成速度は減退したが、園地純光合成速度は増大し続けた。園地LAIが非常に大きいときの朝夕のHMPPFDは小さかったものの、葉量の超過多状態に相当する園地LAI（2.5）の場合でも、暗黒状態ではなかった（第15図左）。樹冠全体に施す遮光実験と異なり、園地LAIが増大し、樹冠内部が相当暗くなっても樹冠表面には絶えず外光が当たったためである。よっ

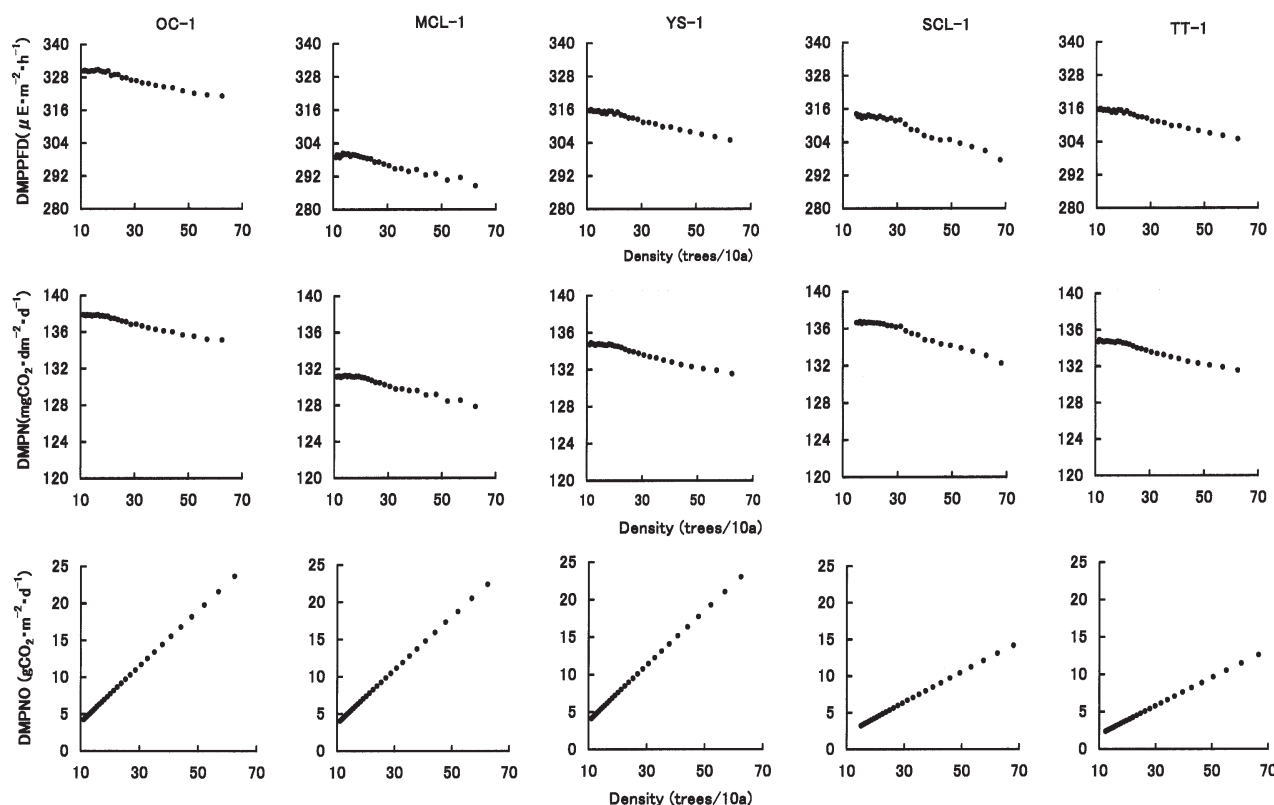


Fig.20 Relations between planting densities in four square planting of the five trees (15 year of tree age) and daily mean leaf PPFD (DMPPPFD, upper), daily mean Pn (DMPN, middle) or daily mean Pn per orchard (DMPNO, lower) on a clear day in the end of July.



て、各時刻のHMPNは減少し続けたものの必ずプラスの値を有していた。これが園地LAIの増大によりHMPNOが増大し続けた理由と考えられる（第15図右）。

園地LAI～DMPNOの曲線から最適な園地LAIを検討するためには、第17図および第18図に示した園地LAI特異点の意味を吟味する必要がある。本実験で算出した日中の純光合成量は6時から18時までの時間帯における葉の全光合成量から葉の呼吸量（光呼吸量と暗呼吸量）を差し引いたものであった。夜間の葉呼吸量は園地LAIにはほぼ比例するものと考えられるが、その呼吸基質は上記の日中純光合成産物に依存する。また、非同化器官である根と枝の終日の維持呼吸量、果実の終日の純呼吸量（果実呼吸量－果実光合成量）も消費される。そのうえに、光合成産物は、呼吸以外に、葉、果実、枝、根などの器官の新生、伸長、肥大、成熟などに回される（転形量）。これらの呼吸量や転形量がいずれも園地LAIに単純に比例すると考えて、これらを園地純光合成量から差し引くことを仮定したい。この仮定に立てば、園地LAIと

DMPNOの関係曲線（第17図および第18図）と弦との間に見られた差のように、LAI特異点付近（晴天日と曇天日とも、5仕立て方法平均で1.034）で余剰光合成産物量が最大になることが考えられる。園地LAIの1.034をLAIaに換算すれば約1.55に相当し、また、CACOASのデータを用いてLAIcに換算すると約3.6になり、これらはほぼ妥当な数値であると考えられる。とは言え、これまでに最適園地LAIに関する研究報告例は見当たらないことに加え、果実生産の観点から、着果量と葉量の適正なバランス（葉果比など）や着色改善に必要な樹冠内の明るさも要求されるので、広い意味での最適園地LAIの検出には、これらの条件を考慮して検討せねばならない。本実験結果はこれらに関連するデータを欠くので、これ以上考察することは控えたい。

#### 4. 果樹園設計上の示唆

先述の円錐体を用いたモデル実験（Ferguson, 1960）の中で樹列方向の比較がなされている。しかし、実際の

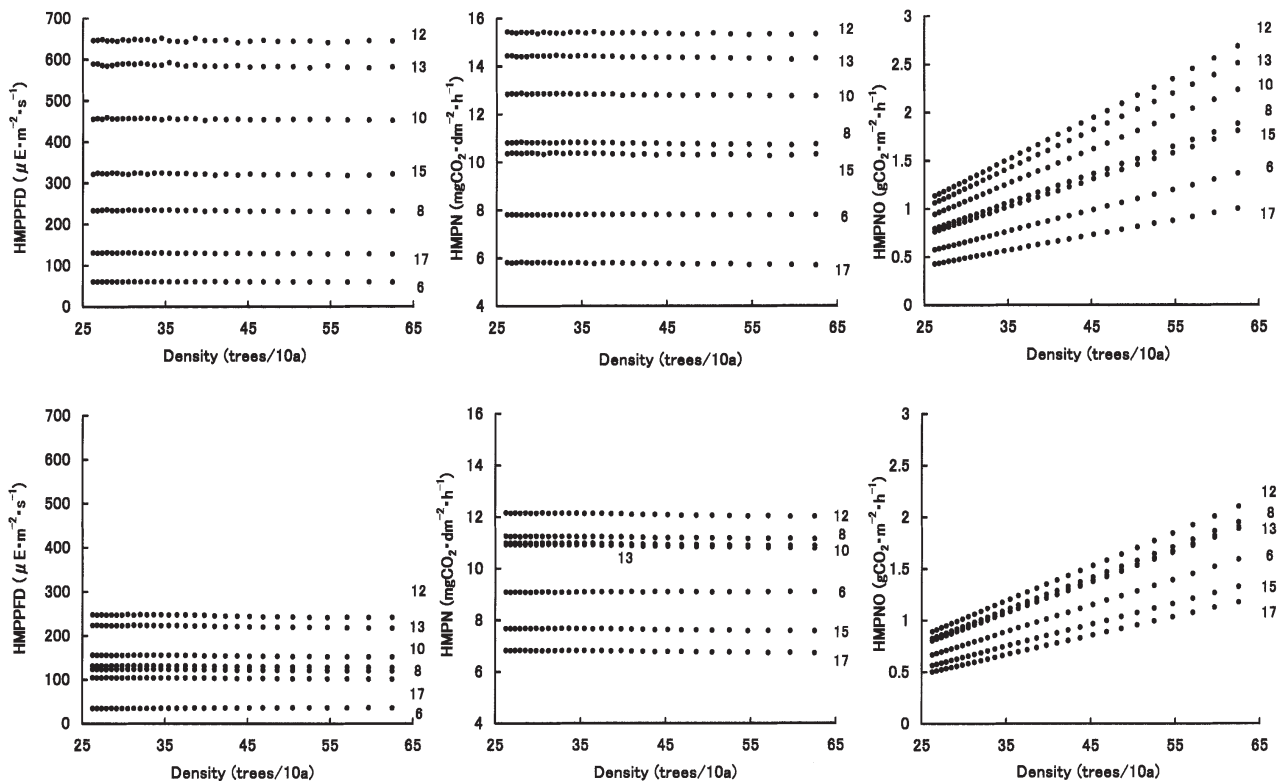


Fig.21 Relations between planting densities in colonnade planting of the OC-1 tree (15 year of tree age) and hourly mean leaf PPFD (HMPPPD, upper), hourly mean Pn (HMPN, middle) or hourly mean Pn per orchard (HMPNO, lower) on a clear day in the end of July. Numerals indicate hours in daytime.

果樹園における推奨すべき樹列方向について、実験データに裏付けられた記述は栽培書の中にも見当たらない。一方、南北方向と東西方向のどちらでも良いと判断できるデータも提供されていない。開園に際し、樹列方向の決定は栽培者にとって不可避の選択肢である。これに関連したシミュレーション実験の結果、精緻なデータが得られたものと思われる（第3表と第4表）。簡潔に言えば、開心形、変則主幹形および細形主幹形の3者では両方向間には光環境の違いが無く、Y字形では南北方向が有利で、トレリス誘引では東西方向が有利であると考えられる。しかし、有利不利とは言え、その差は極めて小さかった。よって、樹列方向については、最初からこれにとらわれることなく、園地の形や周辺環境などを優先的に考慮して決めるのが妥当であろう。

割り当て土地区画を保持する条件下で栽植距離を変えたシミュレーション実験の結果、栽植密度が光環境に及ぼす影響は小さかったが、栽植密度と園地純光合成速度はほぼ比例したことが確認できた（第19図、第20図、第21図および第22図）。このことは密植するほど多収穫

に結びつくことを意味するが、必要最小限の作業道を設置することが望ましいことは言うまでもない。1樹当たり割り当て土地区画を決めずに実施した樹冠内光環境に対する栽植密度効果試験（黒田・千葉，2002）の場合、樹冠内光環境にとりわけ密接な樹冠の形状も栽植密度の影響を受けて大きく変化すると考えられ、栽植密度単独の効果は現われにくいものと考えられる。

計画的密植栽培（薬師寺，1970）は多くの果樹で実施されてきたが、光環境や光合成の方面からこれを検討した研究試験例は見当たらない。第23図、第24図および第5表から、樹齢10年まで密植栽培を続けた計画的密植栽培により、園地当たり累積純光合成量の増大が推察された（第5表）。しかしながら、ちなみにOC樹（南北樹列）の場合、樹列間距離約6mの永久樹2列の間に東西幅4mの割り当て区画をもつ間伐予定樹列が割り込むため、間伐予定樹の割り当て空間の東西両側1m分が永久樹の割り当て空間に重なる。樹齢が低い間、東西樹幅はまだ小さいが、遅かれ早かれ割り当て空間いっぱいまで枝葉が伸びる。よって、密植栽培はせいぜい樹齢6、7

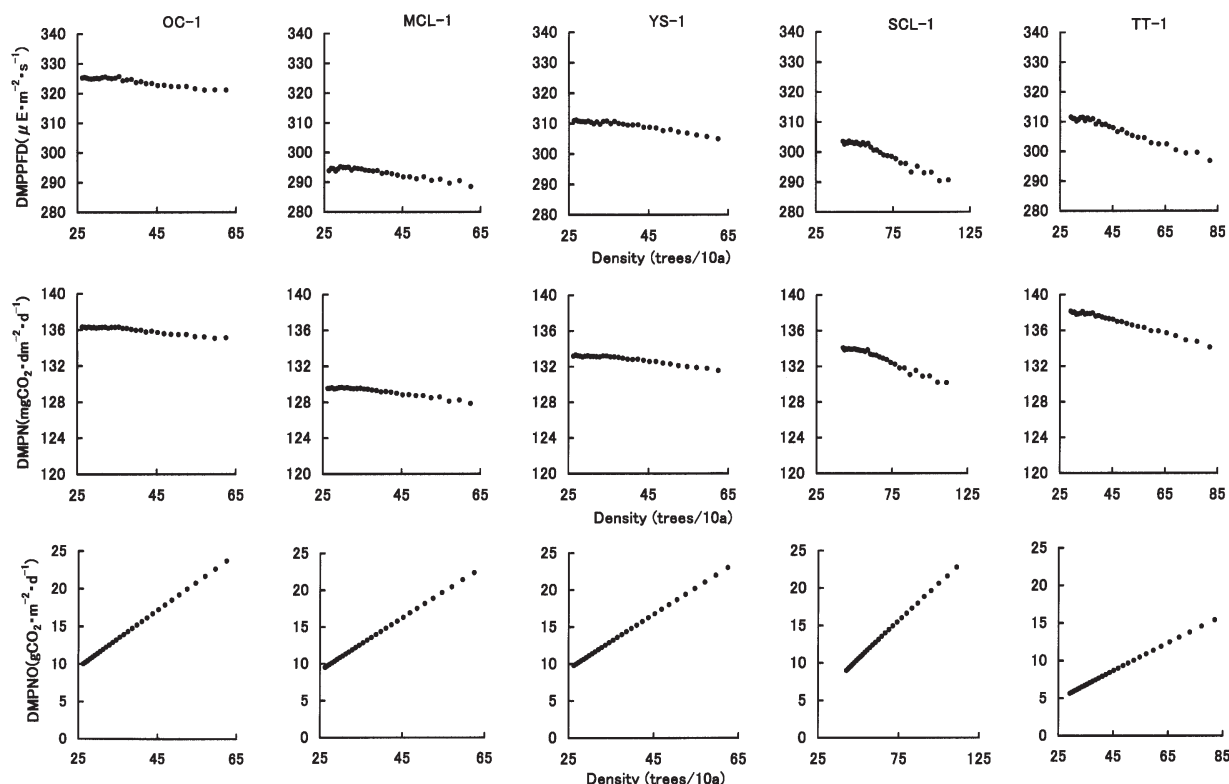


Fig.22 Relations between planting densities in colonnade planting of the five trees (15 year of tree age) and daily mean leaf PPFD (DMPPFD, left), daily mean Pn (DMPN, middle) or daily mean Pn per orchard (DMPNO, right) on a clear day in the end of July.

年までが限度であると考えられる。加えて、材料および方法の4.3)に記したように、このときの光環境が過大評価されていた。上記のことを考慮すると、園地当たりの累積純光合成量の増大量は第5表に記したものより小さいと考えられる。

## 5. 今後の研究に向けて

果実着色改善を目的とした反射フィルムによる樹冠内光環境の改善効果は大きく(田中, 1975), さらに, フィルム反射光による葉の光合成増大効果も認められている(Yamamoto・Miyamoto, 2004)。それでも, 栽培管理作業の都合上, フィルム設置期間は着色期間に限定される。そのほかの果樹光合成作用を高めるための栽培管理として, 肥培管理(Ferree, 1978)や灌水(Gergely・Erdélyi, 1985)が報告されている。肥培管理や灌水の効果は光合成作用における要素欠乏や水ストレスからの回復効果であって, それ以上のものではない。一方, 植物生長調

節物質の散布処理や台木の選択による光合成作用の改善効果は見出されていない(Barden・Ferre, 1979; Ferree, 1978)。また, 夏季剪定は樹冠内光環境を改善するが, 葉量が減ることによる悪影響が考えられる。

上記のように積極的に光合成を高める手段に乏しい中, 仕立て方法の選択や樹冠形の変更による果樹園内光環境の改善は, 果樹の光合成作用の恒常的増進に役立つものと期待され, 筆者も現在このための研究に着手している。けれど, このための調査は数多くの樹を用いた比較試験を余儀なくされる。本研究のように, 季節, 樹齢, 園地 LAI, 栽植密度などを網羅的に取り扱いながら比較調査することはできないであろう。そこで, 本研究結果を参考に, 上記比較調査のためのシミュレーション実験を効率的に行うための必須調査項目と比較条件を列挙したい。すなわち, イ) 全葉調査の厳守, ロ) 晴天日と曇天日の調査, ハ) 全1日(6時~18時)の調査結果に基づく集計データの使用, ニ) 6月下旬~8月下旬の1時期に統一,

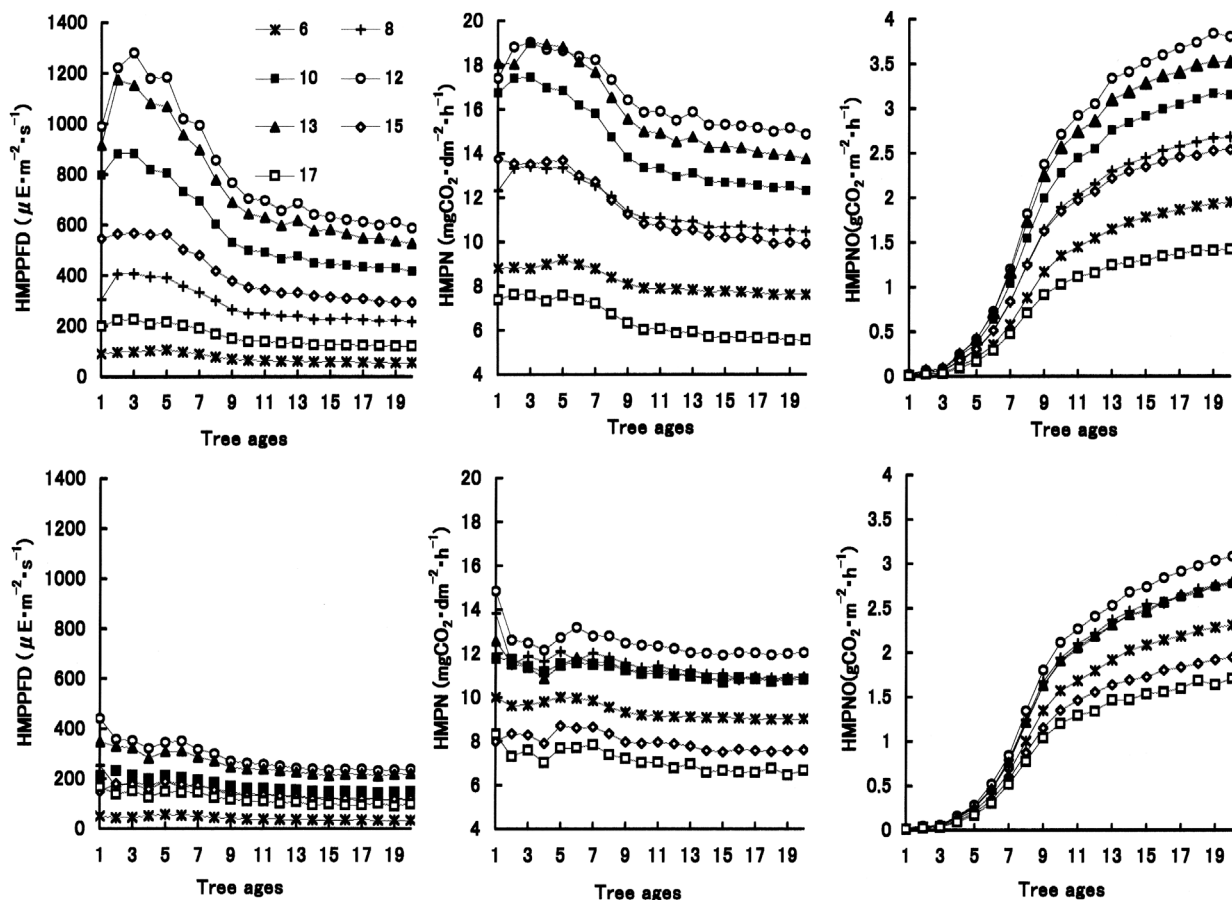


Fig.23 Yearly changes in hourly mean leaf PPFD (HMPFPD, left), hourly mean Pn (HMPN, middle) and hourly mean Pn per orchard (HMPNO, right) on a clear day (upper) and an overcast day (lower) in the end of July of the OC-1 tree densely planted. The numerals indicate hours in daytime.

ホ) 樹齢10年～20年の間の定められた樹齢に統一, ヘ) 園地LAIはその特異点付近の1つの値に統一, ト) 樹列は1方向に統一, チ) 各仕立て方法に対応した1樹割り当て土地区画の使用, リ) 並木植えに統一し, 約1m程度の作業道を確保できる樹列間距離(栽植密度)の使用, などであろう.

本報では実験材料にリンゴ‘ふじ’1品種に用いたが, CACOASとOLEASに用いるパラメータ類については, つる性果樹を除く広範囲の落葉樹種や品種で収集済みである(山本ら, 1990; 山本・奥山, 2004; 山本ら, 2007; 山本ら, 2009). また, 光合成推定式については, カキ1品種(山本ら, 2001), セイヨウナシとオウトウの各1品種(未発表)について調査済みである. よって, 光合成推定式をより広範囲の樹種・品種で収集すれば, 多くの果樹に対して本報と同様なモデル手法を適用できよう. 本報の結果は‘ふじ’1品種に限定したものであったが,

筆者はここで見られた傾向がリンゴの他の品種にもおよそ当てはまるものと考えている. リンゴ品種内ではCACOASとOLEASに用いるパラメータ類は‘ふじ’に似通っており, 傾向を大きく変えるとは思われない.

## 摘 要

樹形構築解析システム(CACOAS)を用いて, 5種類の仕立て方法によるリンゴ‘ふじ’の樹を構築し, これらを配列したリンゴ園を対象に, その光環境を果樹園光環境解析システム(OLEAS)により解析した. また, OLEASからの出力データである葉面PPFD, 気象データなどを‘ふじ’葉の純光合成速度(Pn)の重回帰推定式に代入して園地純光合成速度を推定計算した. 葉面PPFDとPnの分布形は, 晴天では極めて広く, 曇天では狭く, いずれも正規分布とは著しくかけ離れていた.

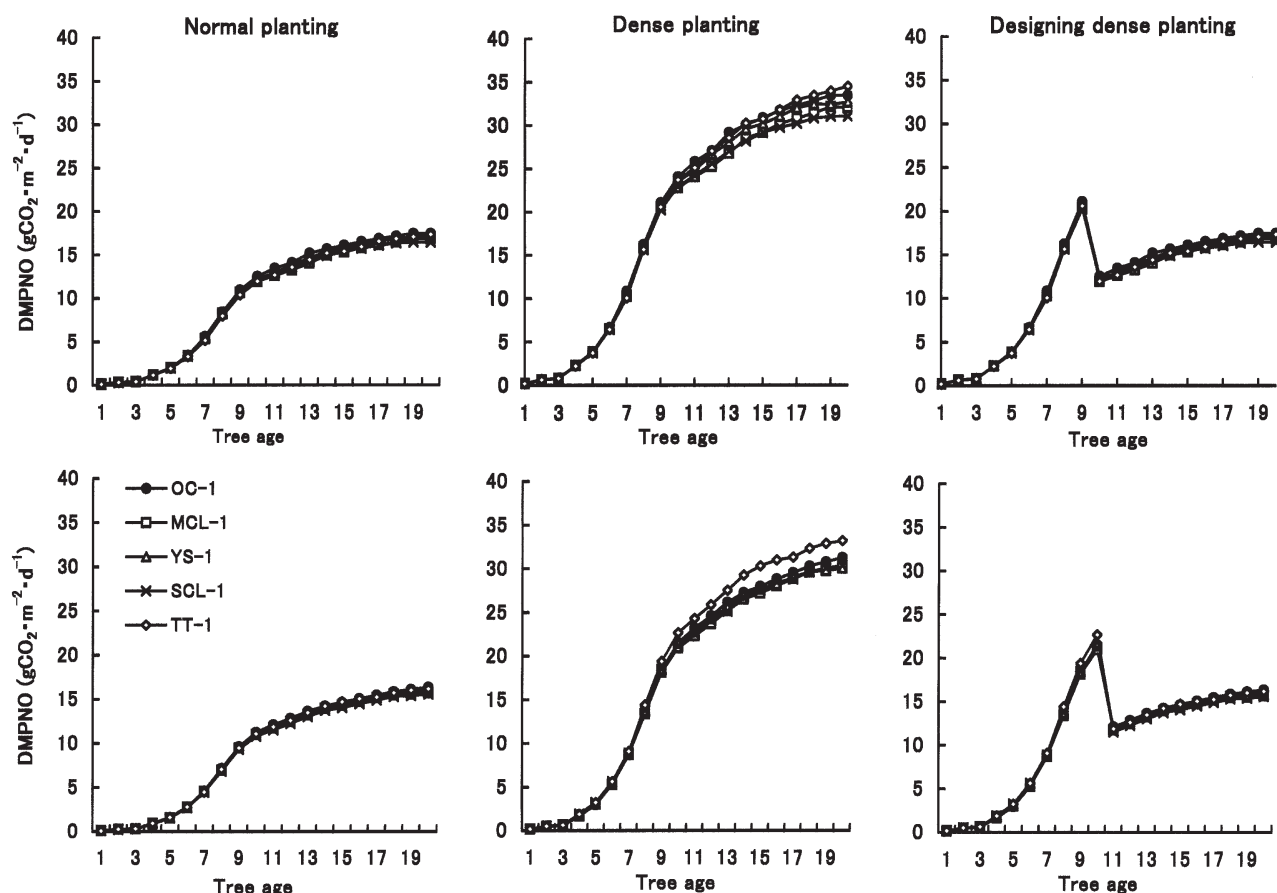


Fig.24 Comparison of yearly changes in daily mean Pn per orchard (DMPNO) on a clear day (upper) and an overcast day (lower) in the end of July of the five trees between normal planting (left), dense planting (middle) and designing dense planting in which tree thinning was done from 11 year of tree age (right).

Table 5 Comparison of sum total of DMPNO (unit:  $\text{gCO}_2\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ ) of the five trees on a clear day (upper) and an overcast day (lower) in the end of July for 20 years between the three planting systems.

Trees	Normal planting (A)	Dense planting	Designing dense planting (B)	B/A (%)
OC-1	205	393	235	114.7
MCL-1	196	374	225	115.0
YS-1	201	385	230	114.9
SCL-1	196	370	225	114.7
TT-1	198	392	227	115.0
Trees	Normal planting (C)	Dense planting	Designing dense planting (D)	D/C (%)
OC-1	185	354	220	119.1
MCL-1	181	344	216	119.2
YS-1	182	348	217	119.5
SCL-1	178	348	215	120.9
TT-1	183	376	223	121.5

CACOASに工夫を施し、樹冠内全葉における葉面PPFD平均値と園地純光合成速度の季節的变化を調査した。その結果、6月下旬に園地純光合成速度のピークが見られ、夏の期間は光環境が悪化するにもかかわらず、物質生産にとって重要な期間であることが認められた。樹冠内全葉における葉面PPFD平均値は樹齢9年頃まで急速に減少し、園地純光合成速度は急速に増大したが、樹齢10年以降、これらの数値は緩やかな変化を示した。樹列方向の違いが樹冠内全葉における葉面PPFD平均値に及ぼす影響は極めて小さかった。栽植距離を変えずに樹の着生葉量を変えたときの園地LAIに対して、樹冠内全葉における葉面PPFDとPnの平均値は対数近似曲線状に減少し、園地純光合成速度は冪乗近似曲線状に増大した。この冪乗近似曲線における園地LAIが約1付近に、急速な増大から緩慢な増大への切り替え点（特異点）が見出され、最適園地LAIと見なされた。割り当て土地区画を保持したまま栽植密度を高めても、光環境はほとんど悪化せず、園地純光合成速度を増大できることが認められた。同様な研究手法により計画的密植栽培と普通栽培を比較した。

#### 引用文献

天野勝司・日野 昭・大東 宏・倉岡唯行. 1972. 果樹の光合成作用に関する研究（第1報）環境条件が光合成作用に及ぼす影響. 園学雑. 412(2): 144-150.  
荒川 修・塩崎雄之輔・菊池卓郎. 1999. リンゴ樹冠内における相対照度、相対光合成有効光量子束および

相対日射量の比較. 園学雑. 68: 297-301.

浅田武典. 1989. リンゴ園における葉面積の推定法. 園学雑. 58: 25-29.

Barden, J. A. 1978. Apple leaves, their morphology and photosynthetic potential. HortScience. 13(6): 644-646.

Barden, J. A. and D. C. Ferree. 1979. Rootstock does not affect net photosynthesis, dark respiration, specific leaf weight, and translocation of apple leaves. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 104: 526-528.

Charles-Edwards, D. A. and M. R. Thorpe. 1976. Interception of diffuse and direct-beam radiation by a hedgerow apple orchard. Ann. Bot. 40: 603-613.

Denholm, J. V. and D. J. Conner. 1982. Potential photosynthesis in trellis-type orchard canopies. Aust. J. Plant Physiol. 9: 629-640.

Ferguson, J. H. A. 1960. A comparison of two planting systems in orchards as regards the amount of radiation intercepted by the tree. Netherland J. Agr. Sci. 8: 271-280.

Ferree, D. C. 1978. Cultural factors influencing net photosynthesis of apple trees. HortScience 13: 650-652.

Gergely, I. and G. Erdélyi. 1985. Relationship between water supply and assimilation in apple trees. Acta Agronomica Academiae Scientiarum Hungaricae. 34: 47-54.

Heinicke, D. R. 1969. The micro-climate of fruit trees. II. Foliage and light distribution patterns in apple trees. Proc. Amer. Soc. Hort. Sci. 83: 1-11.

Jackson, J. E. 1968. Aspects of light climate within apple orchards. J. Appl. Ecol. 7: 207-216.

Jackson, J. E. 1980. Theory of light interception by orchards and a modelling approach to optimizing orchard design. Acta Horticulturae. 114: 69-79.

Johnson, R. S. and A. N. Lakso. 1986. Carbon balance model of a growing apple shoot. I. Development of the model. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 111(2): 160-164.

倉橋孝夫. 1997. リンゴのY字形棚整枝における物質生産と栽培法に関する研究. 島根県農業試験場研究報告. 31: 1-59.

黒田治之・千葉和彦. 2002. M.26わい性台木利用リン



- ゴ樹における生産構造と光環境に及ぼす栽植密度の影響. 園学雑. 71: 544-552.
- Lakso, A. N. and R. C. Musselman. 1976. Effects of cloudiness on interior diffuse light in apple trees. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 101: 642-644.
- Lakso, A. N. and E. J. Seeley. 1978. Environmentally induced responses of apple tree photosynthesis. HortScience. 13(6): 646-650.
- Monsi, M. and T. Saeki. 1953. Über den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion. Jap. J. Bot. 14: 23-52.
- 奥野忠一・久米 均・芳賀敏郎・吉澤 正. 1974. 多変量解析法. 日科技連.
- 小野祐幸. 1985. ウンシュウミカンの光合成および生産構造からみた収量構成要因に関する研究. 京都大学学位論文. p. 1-168.
- Palmer, J. W. 1977. Diurnal light interception and a computer model of light interception by hedgerow apple orchards. J. Appl. Ecol. 14: 601-614.
- Richard, P. M. and J. A. Barden. 1982. Light penetration on overcast and clear days, and specific leaf weight in apple trees as affected by summer or dormant pruning. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 107: 39-43.
- Seeley, E. J. 1978. Apple tree photosynthesis: An introduction. HortScience. 13(6): 640-641.
- 塩崎雄之輔・菊池卓郎. 1988. 樹勢と摘葉作業が開心形リンゴ樹の樹冠内光条件に及ぼす影響. 弘前大学農学部学術報告. 50: 35-45.
- 鈴木鉄男. 1964. 果樹葉面積の概算法に関する検討（第1報）落葉果樹における葉長葉幅法の適用. 農業および園芸. 39: 1585-1586.
- 田中 謙. 1975. 果樹に対する反射フィルムの利用と効果(1). 農業および園芸. 50: 1011-1015.
- 薬師寺清司. 1970. 温州ミカンの栽植密度に関する研究. 愛媛果試報. 6: 1-86.
- 山本隆儀. 1988. 果樹における葉面放射の樹冠内分布推定シミュレーションモデル. 山形大学紀要（農学）10(3): 583-612.
- 山本隆儀・山口恵理. 1989. 果樹の樹形・葉群構造の簡易解析システム—二側面写真画像を用いた新システムの開発—. 山形大学紀要（農学）10(4): 869-901.
- 山本隆儀・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.
- 山本隆儀・畠 良七. 1991. 果樹の樹形・葉群構造の季節的变化推定システム. 山形大学紀要（農学）11(2): 343-373.
- 山本隆儀・佐藤吉雄・舟生卓磨・石嶋幸夫・鈴木計恵子. 1993. カキ“平核無”樹の推定純光合成速度および果実生産性との関係. 園学雑. 62: 27-39.
- 山本隆儀・佐藤吉雄・舟生卓磨・高野隆志. 1995. リンゴ‘ふじ’樹の推定純光合成速度および果実生産性との関係. 山形大学紀要（農学）12(2): 155-166.
- 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.
- Yamamoto, T. 2001. Translocation of  $^{13}\text{C}$ -photosynthates among 2-year-old branches during the rapid growth stage of cherry, pear, apple and persimmon fruit. J. Japan. Soc. Hort. Sci. 70: 170-177.
- 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.
- 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・奥山紳哉. 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・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）に用いた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・麻生桃代・西沢滝太・庄司紀幸・佐藤健吾・小山智江・須田 慶. 2009. 数種落葉果樹の葉面傾斜角度分布に関する研究. 山形大学紀要（農学）15(4): 243-272.