

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

荒川 修・塩崎雄之輔・菊池卓郎

弘前大学農学部 036 弘前市文京町3

Comparison of Relative Illuminance, Relative Photosynthetic Photon Flux and Relative Cumulative Amount of Global Solar Radiation in Apple Tree Canopy

Osamu Arakawa, Yunosuke Shiozaki and Takuro Kikuchi

Faculty of Agriculture, Hirosaki University, Hirosaki, Aomori 036

Summary

Relative light intensities in an apple (*Malus domestica* Borkh.) tree canopy were determined by measuring light quantity :photometrically (illuminance, lx), radiometrically (radiation, $W \cdot m^{-2}$), and in quantum terms (photosynthetic photon flux, $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$). There was a strong positive correlation between relative illuminance and relative photosynthetic photon flux, measured on an overcast day. Relative photosynthetic photon flux was, however, 6.0% higher than relative illuminance. A strong correlation was also found between relative illuminance and relative cumulative photosynthetic photon for one day; the latter was higher by 6.7% on an overcast day and 6.8 % on a clear day. There was a strong positive correlation between the relative cumulative photosynthetic photon and the relative cumulative amount of global solar radiation for one day, while that of relative cumulative photosynthetic photon was 11 % lower than relative cumulative amount of global solar radiation.

Key Words: global solar radiation, illuminance, *Malus domestica*, photosynthetic photon flux.

緒 言

リンゴ果実の生産性と果実品質は光環境と密接に関係していることから、樹冠内の光条件の測定がしばしば行われている (Ferree, 1989; 神戸・小野寺, 1992; 熊代, 1981; Porpiiglia・Barden, 1981; Verheij・Verwer, 1973; Jakson, 1980)。樹冠内の光条件は、受光率として全天光に対する割合で表される場合が多いが、実際の測定においては種々の測器が用いられ、測定方法も様々である。

これまで、日本の栽培者や技術指導者の間では、照度 (ルクス) を計る照度計が用いられる場合が多く、全天光の照度に対する割合である相対照度が光条件を表す指標として用いられてきた (神戸・小野寺, 1992; 熊代, 1981; 塩崎・菊池, 1988; 倉橋・高橋, 1991)。しかしながら、照度計の分光感度は人間の目の比視感度に合せてあり、光合成などの生物反応とは直接には結びつかないものである。また、日射計を用いた報告もなされているが (Proctorら, 1975)、日射計の分光感度は紫外域から赤外域までであり、リンゴ樹の生長に直接関係しない波長も含

んでいる。

光条件を物質生産の指標として果実の生産性と関連づけて考えるためには、光量子計を用いて光合成有効光量子束 (400-700 nm) を測定することがより望ましい。従って、最近の報告では、樹冠内における光合成有効光量子束を測定し、全天光に対する割合である相対光合成有効光量子束が樹冠内の光環境を表す値として用いられる場合が多くなっている (Campbell・Marini, 1992; Robinsonら, 1983; Tustinら, 1988)。しかしながら、光量子計は高価であり、栽培者や栽培指導者の間では照度計も良く使われている。

照度や日射量から光合成有効光量子束へは、光源によって異なる係数を用いて変換することが可能であるが、樹冠内のように、その波長が場所によって異なる場合には、ある係数を用いて変換することは不可能であり、実際に測定することが必要であると考えられる。そこで本研究では、相対光合成有効光量子束と相対照度および相対日射量との違いについて検討し、それらの相対的な値がどのように異なるかについて検討した。

材料および方法

調査は弘前大学農学部附属農場(青森県南津軽郡藤崎町)で行った。照度は照度センサー(IKS-15, 小糸工業株式会社)で, 光合成有効光量子束は光量子センサー(IKS-25, 小糸工業株式会社)で, 日射量は日射センサー(IKS-35, 小糸工業株式会社)を用いて測定した。これらのセンサーはいずれも余弦則を満たすものである。また, 測定前にそれぞれのセンサーの感度が等しくなるように調節した。光量子センサーは, LI-190SB(LI-COR, Lincoln, Neb.)に感度を合わせた。なお, 従来は光合成有効光量子束密度(photosynthetic photon flux density)と呼ばれてきたが, 近年, 束(flux)と密度(density)は同じ概念であるとの考えから, 密度(density)は不用であり, 光合成有効光量子束(photosynthetic photon flux)の使用が提言されており, 本論文ではそれに従った(桂, 1992)。また, 光合成有効光量子束の時間積分値が光合成有効光量子である。

全天光を測定するためにセンサー1個を樹冠外の空き地に置き, 他のセンサーは樹冠内の種々の位置に設置した。これらのセンサーをデータロガー(MP-090, 英弘精機株式会社)に接続し, 10秒毎に測定した10分間の平均値を内部メモリーに連続的に記録した。この記録データをコンピューターに転送し計算処理を行った。

相対照度(relative illuminance)および相対光合成有効光量子束(relative photosynthetic photon flux)は, 樹冠内の照度および光合成有効光量子束の値を, 樹冠外のそれぞれの値で除して求めた。また, 相対光合成有効光量子(relative cumulative photosynthetic photon for one day)は, 樹冠内の光合成有効光量子束の1日分の積算を, 樹冠外の光合成有効光量子束の1日分の積算で除して求めた。

日射量の測定では, 上記の測定による値の1日分の測定値から積算日射量を求め, 相対日射量(relative cumulative amount of global solar radiation)を求めた。

照度と光合成有効光量子束の同時測定は, 1989年9月5日と6日, 8日と9日, 15日と18日にそれぞれ‘ふじ’の開心形樹(9m×9m)の樹冠内の5ヵ所で行なった。また, 9月22日と23日, 29日と30日には, 同じく‘ふじ’の主幹形樹(5m×3.5m)の樹冠内で, 開心形樹と同様に測定を行った。これらの日のうち, 9月6, 9, 18, 22, 29日は曇りで, 他の日はほぼ快晴であった。

日射量と光合成有効光量子束の同時測定は, 1988年の10月9(晴後雨), 10(曇後雨), 11(曇), 12(曇), 13(雨), 15(晴後曇)日の6日間に, 同じ開心形樹の樹冠内に日射センサーおよび光量子センサーをそれぞれ6個設置して行った。

結果

1. 相対照度と相対光合成有効光量子束との関係

1989年9月5日(晴)および6日(曇)の全天光および樹冠内3ヵ所の照度の変化を第1図に示した。晴天日では照度が大きく変化し, 特に樹冠内の明るいところほどその変化は大きかった。曇天日でも全天の照度は変動していたが, 樹冠内の照度の変化は全天の変化に平行的で, 晴天日のように著しく変化することはなかった。

第1図に示した樹冠内の3ヵ所における曇天日の相対照度および相対光合成有効光量子束の1日の変化を測定した結果は第2図に示すとおりである。照度の異なる3ヵ所における両者の値は, いずれも午前7時頃から午後5時頃にかけてはほぼ一定の値をとって安定していた。相対光合成有効光量子束が相対照度より常に高くなった。

相対照度と相対光合成有効光量子束の関係について, 9月6, 9, 18日(開心形樹)と9月22, 29日(主幹形樹)の曇天日における10時から14時の測定値から平均値を求め, 両者の関係を第3図に示した。両者の間には高い正の相関($r=0.98^{**}$)が認められた。この回帰式から, 相対光合成有効光量子束は相対照度に比べて6.0%高くなることが示された。

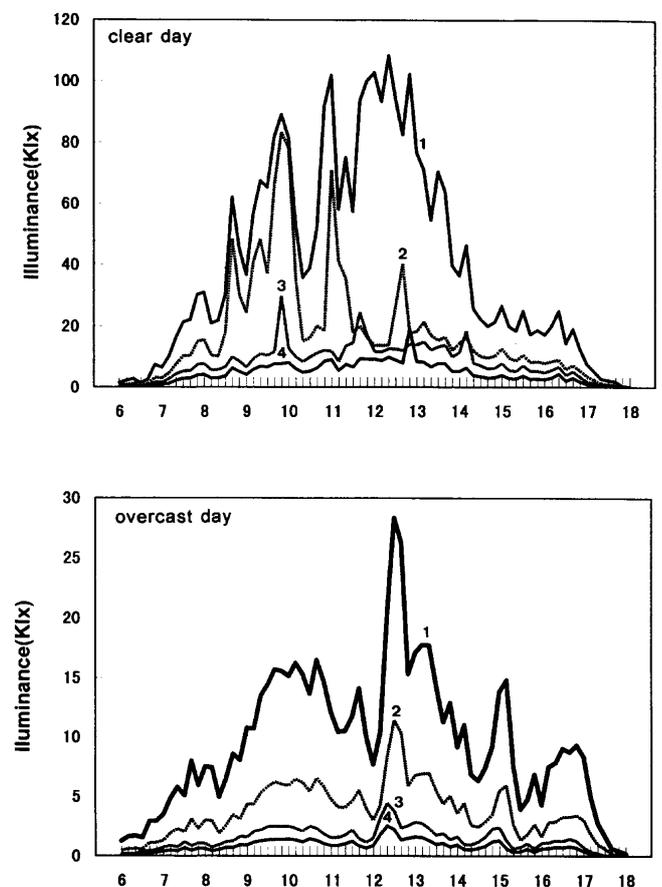


Fig. 1. Diurnal changes of illuminance observed in an open field (1) and three fixed points(2-4) in an apple tree canopy (clear day and overcast day).

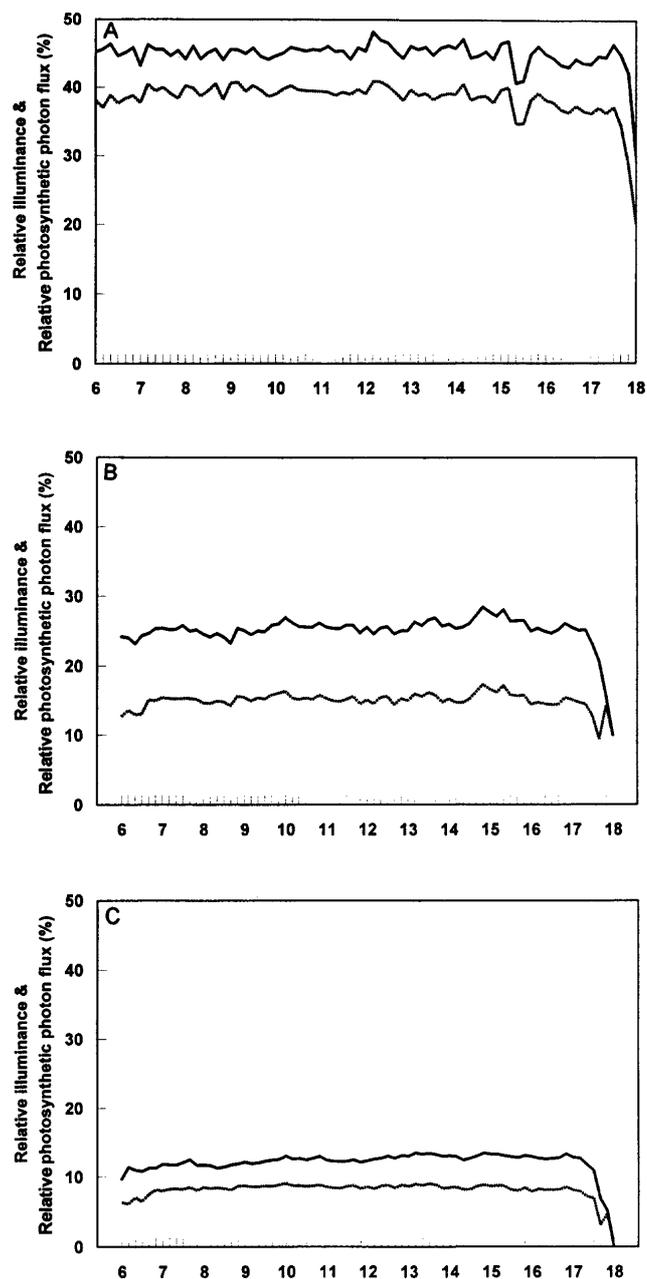


Fig. 2. Examples of diurnal changes of relative illuminance (.....) and relative photosynthetic photon flux (—) at three fixed points (A: Fig.1- 2, B: Fig.1- 3, C: Fig.1- 4) in an apple tree canopy on an overcast day.

第4図に前述の3ヶ所における晴天日(9月5日)の相対照度の変化を示した。日中、相対照度は大きく変動し、特にその変化は明るいところで大きかった。

第5図には相対照度を10分間隔で測定した1日分(午前7時から午後5時)の平均値について曇天日と晴天日との関係を示した。両者の間には高い相関($r=0.99^{**}$)が認められ、特に相対照度の低い所ほどばらつきは小さかった。

曇天日の10時から14時の相対照度の平均値と1日の積算の光合成有効光量子から求めた相対光合成有効光量子との関係を第6図に示した。曇天日(9月6, 9, 18, 22, 29日)の場合には、両者の間に高い正の相関(0.97^{**})が

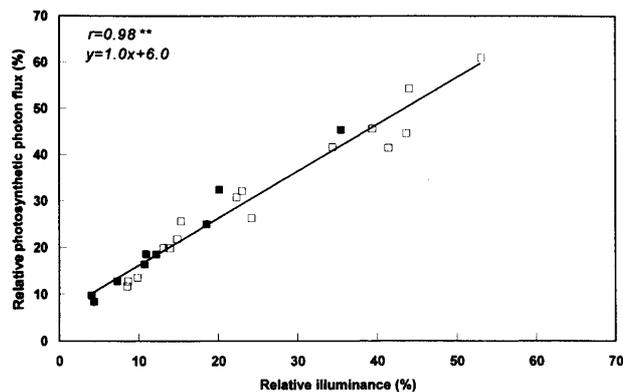


Fig. 3. Relationship between mean relative illuminance and mean relative photosynthetic photon flux, measured at 10 - sec intervals from 10:00 to 14:00 on an overcast day at five points in apple tree canopies trained to a central leader (■) and an open center systems (□). ****Significant at the 1% level.**

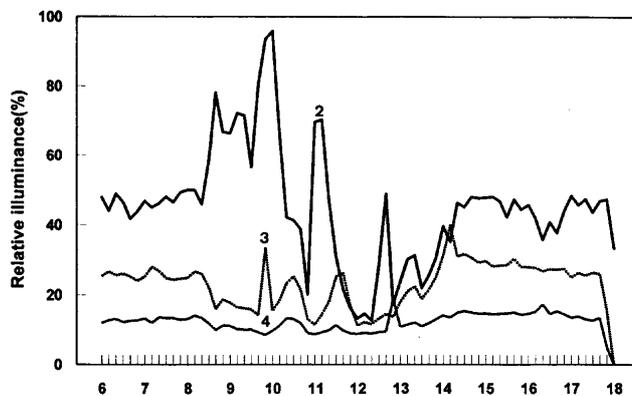


Fig. 4. Examples of diurnal changes of relative illuminance observed at three fixed points (2, 3, 4 in Fig. 1) in an apple tree canopy on a clear day.

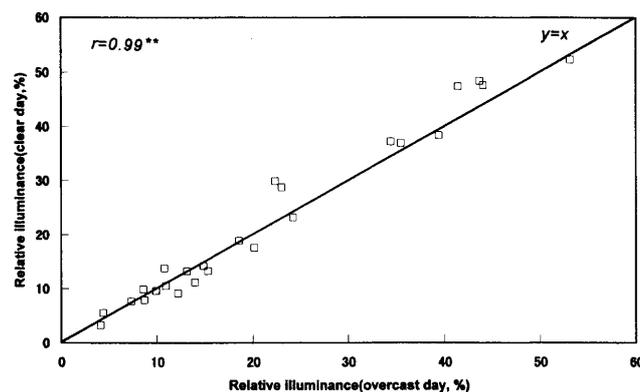


Fig. 5. Relationship between mean relative illuminance at 10-sec intervals from 10:00 to 14:00 on overcast day and clear day at five points in an apple tree canopy. ****Significant at the 1% level.**

認められた。相対光合成有効光量子は相対照度に比べて6.7%高かった。晴天日(9月5, 8, 15, 23, 30日)では、両者の間には高い正の相関(0.90^{**})が認められたものの、

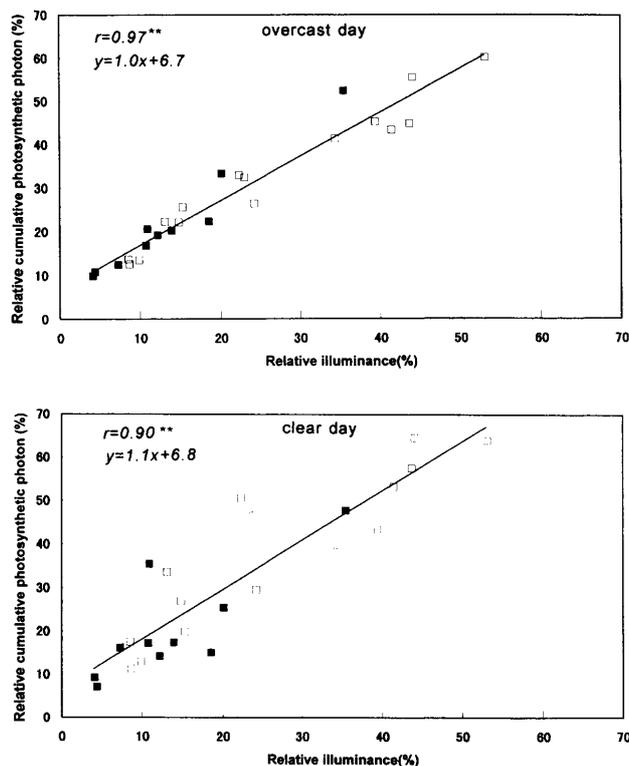


Fig. 6. Relationship between mean relative illuminance measured at 10-sec intervals from 10:00 to 14:00 and relative cumulative photosynthetic photon measured from 6:00 to 18:00 on apple trees trained to a central leader (■) and an open center systems (□). **Significant at the 1% level.

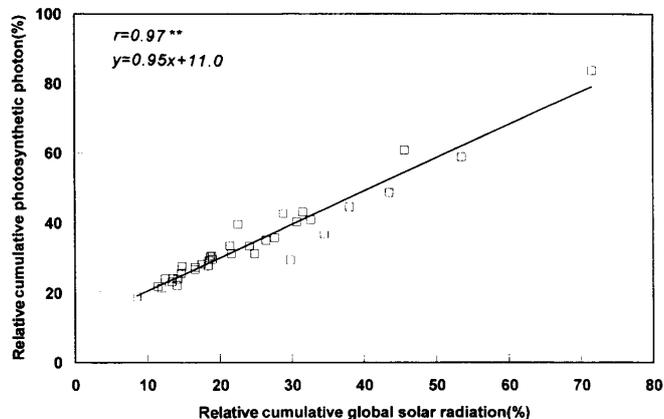


Fig. 7. Relationship between relative cumulative photosynthetic photon and relative cumulative amount of global solar radiation for one day. **Significant at the 1% level.

値のばらつきが大きくなった。回帰式による両者の値の違いは6.8%で、曇天日とほぼ同じであった。

2. 相対光合成有効光量子と相対日射量との関係
1988年10月9, 10, 11, 12, 13, 15日に測定した1日の積算日射量による相対日射量と相対光合成有効光量子との関係を第7図に示した。両者には高い正の相関($r=0.97^{**}$)が認められた。回帰式から、相対日射量は相対光合成有効光量子に比べて11%高かった。

考 察

日本では、リンゴ樹における樹冠内の光条件の報告は、照度計による相対照度で光条件を表したものが多い(神戸・小野寺, 1992, 熊代, 1981, 塩崎・菊池, 1988, 倉橋・高橋, 1991)。しかしながら最近では、光量子計の測定による相対光合成有効光量子束が用いられる場合が増えているが、それぞれの値がどのような関係があるのかについては全く分かっていない。

本研究の結果から、相対照度と相対光合成有効光量子束を比べると、両者の間には高い相関は認められたものの、その値は明らかに異なり、相対光合成有効光量子束は相対照度に比べて値が高くなることが明らかになった。この関係は、日中、非常に安定していた。また、1日の積算の光合成有効光量子による相対光合成有効光量子と相対照度を比べると、相対照度の値の方が低かった。その違いは相対照度と相対光合成有効光量子束(瞬間的な測定)の差と大きな違いはなかった。しかしながら、曇天日では両者の関係はほぼ直線となるが、晴天日では値のばらつきが大きくなった。

樹冠内部のような植物群落内では、青色から緑色光部分の光エネルギーが相対的に減少し、700 nm以上の光の割合が高いことが認められている(Proctorら, 1975)。また、緑色域は葉による吸収が少なく、青色域より減少が少ないことが報告されている(玖村, 1969)。照度計は、人間の目が一番明ると感じる緑色域(550 nm)の感度が最も高くなっているが、植物群落内の相対照度は、可視域(390-690 nm)のエネルギーの相対値と比較すると、ほぼ同じか若干低くなることが認められている(玖村, 1969)。今回の結果で、相対照度が相対光合成有効光量子束に比べて低くなったことは、光量子センサーは400-700 nmのより広い波長域の光量子を測定しており、その分光感度特性が、光合成の量子効率を考慮して、400-700 nm間が等しい光量子感度となるように、エネルギーで表した相対感度が400 nmから700 nmに向かって直線的に高くなっていることに起因すると考えられる。

一方、相対日射量は相対光合成有効光量子に比べて高くなった。日射センサーは光量子センサーよりさらに幅広い波長感度をもっており、日射センサーは近赤外部の光を含めて測定していることが相対日射量と相対光合成有効光量子の値の違いの原因であると考えられる。紫外域から赤外域まで幅広く測定した場合の光エネルギーの群落内での相対値は、相対照度に比べて高くなることを、ダイズ群落で玖村(1969)も認めている。

本研究で用いたそれぞれのセンサーは比較的安価な簡易的なものであるが、それぞれの測定には実際には波長感度特性が少しずつ異なる様々な測器が用いられている。従って、それらすべての測定について、今回得られた相対照度と相対光合成有効光量子の差および相対日射量と

の差をそのままあてはめることは出来ないが、それらの大小の関係については普遍的であると考えられる。

相対照度および相対光合成有効光量子束の測定は、直射光の光斑の影響を避けるために、曇天日の瞬間的な測定によって求められる。今回の結果でも、曇天日では両者の値は日中の変動が少なく安定していたが、晴天日では大きく変動していることが認められた。Campbell・Marini (1992) は、1日の積算の光合成有効光量子による受光率は、晴天日の瞬間的な測定による受光率より、曇天日の測定の方がより良く一致することを認めている。この理由として、晴天日では、受光率が比較的低い場合にはその1日の変化は小さいが、受光率が高い地点においては太陽の位置によって直射光の影響を受けやすく、受光率が時間によって大きく変動するためであると推察している。今回の結果でも晴天日の値は大きく変動していたが、1日の平均を求めると、曇天日の値との違いは最大でも10%程度だった。特に暗いところでは変動は少なく、曇天日との違いも小さかった。このことから、晴天日でも多くの測定を行ってその平均をとれば、曇天日の測定値を見積もることが可能であると考えられる。

摘 要

リンゴ樹の樹冠内の光条件の測定方法について、樹冠内の全天光に対する割合を、照度 (lx), 光合成有効光量子束 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) および日射量 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) の測定から求め、その違いについて検討した。

照度の測定による相対照度と光合成有効光量子束の測定による相対光合成有効光量子束との間には高い正の相関が認められた。しかしながら、両者の値は明らかに異なり、相対光合成有効光量子束は相対照度の値に比べて6.0%高かった。このことは、1日の積算の光合成有効光量子から求めた相対光合成有効光量子と相対照度との関係にも認められ、その差は曇天日で6.7%、晴れの日で6.8%だった。日射計による1日の積算日射量から求めた相対日射量と相対光合成有効光量子との間にも高い正の相関が認められたが、相対日射量の値が相対光合成有効光量子の値に比べて11%高かった。

引用文献

Campbell, R. J. and R. P. Marini. 1992. Instantaneous light measurements predict relative cumulative light levels within

- an apple canopy. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 117(4) : 678-684.
- Ferree, D. C. 1989. Influence of orchard management systems on spur quality, light, and fruit within the canopy of 'Golden Delicious' apple trees. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 114 (6) : 869-875.
- Jackson, J. E. 1980. Light Interception and Utilization by orchard systems. p.208-267. In: J. Janick (ed.) *Hort. Rev.* vol 2. The AVI Publishing Company, INC., Westport, Connecticut.
- 神戸和猛登・小野寺勇. 1992. リンゴわい性樹 'ふじ' の樹冠内光環境の時期別変化と受光量が果実品質に及ぼす影響. *園学雑.* 61 (別1) : 98-99.
- 桂 直樹. 1992. 光測定の実際. 光バイオインダストリー. p.182-198. 照明学会編. オーム社. 東京.
- 熊代克己. 1981. リンゴの1樹内における受光度と果実品質との関係. *園学要旨.* 昭和56 : 60-61.
- 玖村敦彦. 1969. 大豆の物質生産に関する研究. 第6報. 個体群葉層内における光の質的变化と個葉の光質-光合成関係. *日作紀.* 38 : 408-417.
- 倉橋孝夫・高橋国昭. 1991. リンゴの棚仕立て Y 字形整枝法に関する研究 (第3報) 樹冠内の相対照度と光合成特性. *園学雑.* 60 (別1) : 70-71.
- Porpiiglia, P. J. and J. A. Barden. 1981. Effects of pruning on penetration of photosynthetically active radiation and leaf physiology in apples trees. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 106 (6) : 752-754.
- Proctor, J. T. A., W. J. Kyle and J. A. Davies. 1975. The penetration of global solar radiation into apple trees. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 100 (1) : 40-44.
- Robinson, T. L., E. J. Seeley and B. H. Barritt. 1983. Effect of light environment and spur age on 'Delicious' apple fruit size and quality. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 108 (5) : 855-861.
- 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. *弘大農報.* 50 : 34-45.
- Tustin, D. S., P. M. Hirst and I. J. Warrington. 1988. Influence of orientation and position of fruiting laterals on canopy light penetration, yield, and fruit quality of 'Granny Smith' apple. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 113 (5) : 693-699.
- Verheij, E. W. M. and F.L.J.A.W. Verwer. 1973. Light studies in a spacing trial with apple on a dwarfing and a semi-dwarfing rootstock. *Sci. Hort.*, 1 : 25-42.