研究論文

樹木の日射軽減作用に関する研究

山 田 宏 之*
丸 田 頼 一*

Studies on the Reduction of the Solar Radiation
under the Isolated Trees.

Hiroyuki YAMADA, Yorikazu MARUTA

摘要: 樹木による日射軽減効果を明らかにするために、ケヤキとキンモクセイの単木の緑陰を対象に、樹影内外の日射量分布の測定を行い、次のような結果を得た。1) 快晴の場合、樹影内の日射量分布の日変化は比較的少い。2) 樹影内の日射量は、天気の違いにより大きく変化し、快晴時に最小、晴、曇の順に、より大きい値を示した。3) 樹形の相違によっても日射の軽減率は異なり、樹冠が広く低い樹木ほど、その率が大きい。

1. 緒 言

古代エジプト人は、緑多い庭園を永遠の楽園と考えていた。そして、毎日欠かさず池の縁を散歩し、シカモアの木の下に憩うことを、死後の生活の最高の理想としていたという。¹²⁾

エジプトのような低緯度地域の人々はもちろん、我々のような中緯度地域に住む者にとっても、夏期の強烈な日差しをさえぎってくれる緑陰下は快適な戸外の休息場となる。また、公園等の緑陰は、ベンチ、遊具などの休養施設、遊戯施設の過度な昇温を防止し、また、日射病等を引き起こすほどの強い日差しから利用者を守るなどの機能が見出される。さらに、屋外駐車場においても、緑陰樹が配されていない場合には、車の室内温度が過度に上昇する。

これらの事象から、樹冠により日射が遮蔽されるために、より快適な環境が形成されることは明らかであるが、実際に遮蔽効果を定量的に調べた例は、微気象や農業気象の分野において、主に森林を対象として測定がなされているのみであり、公園等で一般的に緑陰樹として供されているような、単木を対象にした研究は、ほとんど見受けられない。そこで、本研究では、緑陰内の日射環境を明らかにすることを主目的とし、樹木、特に単木による日射の軽減量を日射計を用いて実測し、さらに、その結果をもとに、緑陰の効果を修正気温を尺度として若干の考察をくわえることにした。すなわち、過去においては、緑陰のもたらす効果を論じるにあたって、緑陰内の気温、湿度等の測定を行い、一般的な不快指数 (Disco-

mfort Index, $DI = 0.72(t_d + t_w) + 40.6$, DI : 不快指数, t_d : 乾球温度, t_w : 湿球温度) を計算した例があるが、それによると、緑陰外との明確な相違は現れていない。そこで本研究では、日射量を算入する温度指数を用いて、日射軽減効果の数量化をはかり、より明確に緑陰の効果を把握した。

2. 研究方法

(1) 調査対象樹木

樹木選定にあたり、上野公園(東京都台東区)、松戸中央公園(千葉県松戸市)等で、各種樹木や樹林による樹影内の日射量の予備調査を、1986年7月27日～8月7日の間に行った。その際には、樹冠の大きさの異なる樹木等を、できる限り多く選んだ。また、測定は、樹影の中央部(幹付近)、中間部および周辺部の3地点でおこない、そして、代表的な数本の樹木について、快晴時や曇天時の、天気別の測定も行った。その結果、おおよそ次のようなことがわかった。

① 樹影に光斑(木もれ日, sunflecks)が多い場合、その影響を受けて測器の表示が安定しない。すなわち、光斑を含めた平均的な日射量を求めることは、一般的には難しい。例えば、高木のユーカリの樹影内で、日射計を10cm程度ずつずらしながら、快晴の正午前後、ほぼ無風の条件下で日射量を測定した結果では、日射量は0.5～2.5 mVの間のさまざまな値を示すために、日射量分布の傾向を把握することには困難を窮めた。このように、

* 千葉大学園芸学部

例え、樹影内であっても、光班の多くみられる場合には、数値に大きな開きがあり、安定した測定結果を得ることができないことがわかった。

②シダレヤナギ、アキニレなどの、比較的小型の葉で疎な樹冠を形成する樹木では、光班が連続したような、ムラのある薄い影ができ、この際も部分的な日射量の変動が大きく、一定した値が得られにくい。

③周囲に近接して他の樹木や建築物などがあると、それが樹影内の日射量に影響を及ぼす。その影響の程度は、天気や時間によって変化し、一定していない。

以上のような結果を考慮して、今回の研究対象としては、樹影に光班の比較的小さい、したがって、比較密な樹冠を有する樹木で、できる限り周囲に障害物の無い場所に位置する対象を選ぶことにした。ただし、実際問題として、緑陰木全てが、そのような条件を有しているとは限らないので、上述したような光班の部分も含めた測定も今後行ってみる必要があるものと言える。

樹木の形態としては、単木で生長しているものを対象とし、これらの条件を満たす樹木を、古河市総合公園（茨城県古河市）と千葉大学園芸学部（千葉県松戸市）から、測定対象木として数本を選んだ。そして本論文では、これらのうちから、測定条件が比較的安定し、十分な資料を得ることができた2本の樹木、ケヤキ（*Zelkova serrata*）（写真—1）、キンモクセイ（*Osmanthus fragrans var. auranticus*）（写真—2）を取り上げて解析し、考察を加えていくことにする。

対象樹木のうち、ケヤキは、樹高9.5 m、枝張11.0 m、この種としては中型の木である。キンモクセイは、樹高6.5 m、枝張7.0 mであり、この種としては、比較的大きな木である。これら2本共、植栽後10年以上経過し、比較的健全に成長している樹木で、地面は、樹冠下に土壌面が一部露出しているものの、殆ど芝である。なお、キンモクセイについては、緑陰樹として、一般的な樹種とはいえないが、写真—2にみられるように、この公園では実際に緑陰樹として用いられていることや、前述したような測定条件を比較的満たしていることから、調査樹木として選定した。

(2) 調査期間

本研究の目的が、夏期における樹木の日射軽減量の測定にあるので、調査期間は、1986年8月1日～9月7日の間とした。

(3) 使用器材

使用した日射計は、英光精器製MS—61型全天日射計、感度は 7 mV/kW m^{-2} （ $= 4.88 \text{ mV/cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ ）、応答速度、 $1/e = 6 \text{ sec}$ であり、読取りは、デジタルmV計を接続して行った。

なお、本研究では、樹影内の日射量の水平分布を測定することが必要になるために、日射計を移動させながら

写真—1 ケヤキ

写真—2 キンモクセイ

計測していくことになる。したがって、応答速度の問題が重要になってくる。堀口（1976）によれば、弱光量下では日射計の反応過渡時間が大幅に延長される、という結果が出ているので、樹影内の日射量程度の条件下での過渡時間を確かめるために、事前に応答速度実験を行ってみた。その結果、単木の樹影内程度の日射量レベルでは、45～60秒程度で表示が安定することがわかったために、その点を考慮に入れて、日射量の読取りをおこなった。

(4) 測定方法

(I) 日射量の日変化測定

樹影内地表面における日射量が一日の時間の経過とと

もに、どのように変化するかを調べるために、次のような測定を行った。9時～16時の間、1時間毎に樹影内の日射量分布を測る。そのためにまず、樹影内に巻尺を2本用いて直交基線を設定し、50cmおきに測定点を決める。そして、その測定点上の日射量を測り、その値を方眼紙上の樹影の縮尺図にプロットして、最終的には、等しい日射量の点を結んで時間毎の等日射量曲線を描き、日射量分布を比較する方法をとっている。

また、樹影内日射量との比較の基準となる、樹影外の日射量については、全天日射量と散乱日射量を測定している。散乱日射量は、遮光板を用い、直達日射を遮りつつ測定した。通常、日射量というのは水平面に入射する直射光、散乱光を合わせた全天日射量(global solar radiation)であり、前者を直達(direct)日射量、後者を散乱(sky)日射量と言い、単位は $\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$ 、あるいは ly/min か、 mW/cm^2 で表される。⁴⁾ 本稿では、世界放射基準(WRR)にもとづき、単位としては、 mW/cm^2 を用いている。¹⁸⁾ また、本研究において、全天日射量と共に散乱日射量を測定したのは、樹林内での日射量の値には、散乱日射が大きな影響を与えているという研究結果が知られているためである。²⁾

なお、樹木による日射の軽減効果を知るための天候条件としては、終日、雲やモヤなどがかからない快晴の日を選ぶ必要がある。1986年9月4日は、最高気温 32.8°C 、台風15号一過の快晴であり、本稿に測定結果を述べてある、9時～16時の間、雲量は0、比較的理想的な状態下での測定であった。つぎに、樹影内の垂直的な日射量分布を把握するために、1986年9月5日の快晴時に、ケヤキを用いて測定した。その際の測定方法は、樹幹から北に測定基線を1本設け、その上を50cmおきに、地上0m、0.9mおよび1.5mの各高さでの日射量を測り、それらの結果をもとに立面的な等日射量曲線を求めた。

(III) 天気による差異の測定

樹木による日射の軽減効果をより詳細に調べるために、天気によるその差異を知ることも必要である。そこで、測定対象の2本の樹木について、同様の方法で、晴天時(1986.9.1)と、曇天時(1986.8.31)の12時に測定を行った。

なお、天気による差異を比べる場合においても、経時変化を追うことが理想的であるが、短時間のうちに雲などの天候条件が変化して、直達日射量や散乱日射量も変わることが多く、そのような測定は、事実上、不可能であることが判明したために、12時の測定結果を比較するのみに留めた。

(III) 緑陰の温熱環境評価

樹影内の日射量分布結果をもとに、温熱環境指数の一種であるソルエア温度(相当外気温)を算出し、樹影内外の比較を行った。

ソルエア温度(Sol Air Temperature, SAT)とは、太陽などを考えた外界輻射に対して、その等価温度に値する分の空気気温を修正して算出する値であり、次式で与えられる。¹⁶⁾

$$\theta_{\text{solair}} = \theta_a + R_{\text{so}}(\epsilon_{\text{sun}} J_{\text{sun}} + \epsilon_{\text{jnit}} J_{\text{jnit}}) \text{ deg}$$

θ_{solair} : ソルエア温度(SAT)

θ_a : 空気温度

R_{so} : 外気側表面積伝達抵抗

ϵ_{sun} : 太陽輻射吸収率

J_{sun} : 太陽輻射($\text{K cal}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)

ϵ : 常温吸収率

J_{jnit} : 夜間輻射($\text{K cal}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)

放射を考慮した温度指標としては、Yaglou—MinardのWBG T指数等があるが、¹⁷⁾ いずれも、夏期の直射日光下のような強い放射を算入するには不適当であったり、直射日光にさらされる場所と、日陰地では異なった式を用いるものであったりし、本研究の主旨に合致しない。そこで、強日射の算入に適し、比較的算出も容易であるSATを樹影内の温度評価として用いることにした。

(IV) その他気象条件の測定

(I)～(III)の測定時には、雲量、気温、湿度および風速の測定を同時に行っている。雲量は、気象庁による目視の10分割法で測定してある。

3. 研究結果および考察

(1) ケヤキについて

(I) 日射量の日変化

ケヤキの樹影内における平面的な日射量分布の日変化の測定結果をFig.1示してある。図中、日射量の単位は、煩雑になるのを避けるため、測器のmV単位のままで表してある。 $(1\text{ mV} = 14.3\text{ mW}/\text{cm}^2 = 0.205\text{ cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ これは、以下全ての図表に共通であり、また、樹影外の日射量は、全天日射量/散乱日射量のように表示してある。なお、図中、樹冠は点線で、樹幹は黒丸で示し、樹影は実線で、その外形を示し、樹影内部には、同じ実線で等日射量曲線を描いてある。本図から、全天日射量は $2.4 \sim 5.7\text{ mV}$ ($34.3\text{ mW}/\text{cm}^2 \sim 81.5\text{ mW}/\text{cm}^2$)まで大きく変化しているが、散乱日射量は、9時～15時までは、 0.7 mV ($10.0\text{ mW}/\text{cm}^2$)16時に 0.6 mV ($8.6\text{ mW}/\text{cm}^2$)であり、ほとんど変化しないことがわかる。これは、Monteith, J. L. (1976)⁸⁾が述べているように、快晴時の一般的な日射量の変化の傾向といえる。

樹影内の日射量をみると、最小値の部分では、9時～14時までは、 0.3 mV ($4.3\text{ mW}/\text{cm}^2$)15時～16時で、 0.4 mV ($5.7\text{ mW}/\text{cm}^2$)である。最大値の部分では、9時～15時までは、 0.5 mV ($7.2\text{ mW}/\text{cm}^2$)16時で、 0.6 mV ($8.6\text{ mW}/\text{cm}^2$)であり、全体的にみて、樹影内の日射量は、ほとんど変わらないことがわかる。従って、樹影内

全天日射量 / 散乱日射量
9 : 00 4.8 / 0.7

10 : 00 5.0 / 0.7

11 : 00 5.5 / 0.7

12 : 00 5.7 / 0.7

13 : 00 5.3 / 0.7

14 : 00 4.7 / 0.7

15 : 00 3.7 / 0.7

16 : 00 2.4 / 0.6

Fig. 1 ケヤキの樹影内地表面における日射量分布の日変化。
測定日：1986年9月4日 単位：mV (1 mV = 14.3 mW/cm²)

の日射量は、比較的安定した値であり、時間による日変化が小さいものと言える。

日射量 0.4 mV (エネルギー換算 5.7 mW/cm^2) は、齊藤 (1977) によれば、夏期の平均的な夜間輻射量と同じ程度のレベルであるから、樹影内での放射収支は 0 に近い値であり、したがって、日射による樹影内の物体の温度上昇が避けられるものと考えられる。

なお、(樹影内日射量/全日射量)の値を樹影内日射到達率として、その値を算出すると、樹影中心部で、9 時に約 6%，12 時に約 5%，16 時に約 17% となる。樹林内の林床に達する日射量の表記としては、例えば、吉野 (1970) による、透過率、Oke (1978) による、Penetration (浸透量)、Monteith (1975) による、Transmissivity (伝達率)、などがあるが、いずれも、連続して切れ目の無い樹冠部を透過する日射量を表す語句である。一方、本研究の対象のような単木の場合、樹冠の周囲に天空が露出しており、その部分から散乱日射が直接到達するので、透過、あるいは浸透という語句は適切でないため、日射到達率とした。

(III) 天気による差異

正午における天気別の樹影内における平面的日射量分布を比較したものが Fig. 2 である。

天気の区分は、気象庁の分類方式により分けたが、図中、これらのうち快晴は、台風一過の大変透明度の良い日、晴は、雲量 8 以下の晴天の日、曇は、全天が雲に覆われた、曇の日の資料である。

全日射量は、快晴時、 5.7 mV (81.5 mW/cm^2) 晴、 5.2 mV (74.4 mW/cm^2) 曇、 2.2 mV (31.5 mW/cm^2) と減少しているが、散乱日射量の方は、快晴時、 0.7 mV (10.0 mW/cm^2) 晴、 2.2 mV (31.5 mW/cm^2) 曇、 2.2

mV (31.5 mW/cm^2) と、増加している。

本図から明白のように、天候により大きな違いがみられる。すなわち、樹影内の日射量は、最小値の部分で、快晴、 0.3 mV (4.3 mW/cm^2) 晴、 0.7 mV (10.0 mW/cm^2) 曇、 0.9 mV (12.9 mW/cm^2) である。また、これを到達率でみると、日射量最小の部分で、快晴：5.3%，晴：13.5%，曇：40.9%，となっている。このように、到達率は快晴時に最小になり、晴、曇の順で大きくなっていく。また、線の混み具合から、天気が悪い程、影周辺部での日射量の増加が激しいことが分かる。これは、曇天時の方が散乱日射量が多いために、樹冠周辺の天空からの散乱日射の入射量が增大することに起因するものと考えられる。この結果および、先の日変化の測定結果で、樹影内の日射量が、全日射量の変化にかかわらず、ほとんど変化しなかったことから、樹影内の日射量には、全日射量の変化よりも、散乱日射の変化の方が大きく影響することが分かる。つまり、単木の場合、樹冠部周辺の天空部からの散乱日射の影響が大きく、それが樹木の日射軽減効果の大きさを決定づける要因になることが考察される。

(III) 緑陰の温熱環境評価

Fig. 2 の測定結果をもとに、樹影内外のソルエア温度を算出した結果は Fig. 3 に示してある。なお、前述した算出式のうち、

$$R_{so} = 0.05 \text{ (風速 } 3 \text{ m/s 相当)}$$

$$\epsilon_{sun} = 0.9$$

$$\epsilon = 0.9$$

$$J_{nit} = -50 \text{ K cal/m}^2 \cdot \text{h}$$

と仮定し、結果を示してある。 R_{so} については、測定期間中に示された一般的な数値を用いている。その他、

ϵ_{sun} 、 ϵ および J_{nit} については、齊藤 (1977)、羽生 (1984) 等による数値を用いてある。これらの仮定値は、キンモクセイについても同様である。

日射地と樹影内のソルエア温度の比較では、快晴時、 29.8°C もの差が生じ、樹陰の効果の大きさが、明白に現れているが、晴の場合でも 24.5°C 、曇では 6.9°C と、夫々の気温の値が異なる条件下といえども、全日射量の量に起因し、ソルエア温度に差異が生ずることがわかる。

Fig. 4 ケヤキ樹冠下の日射量の垂直分布 測定日：1986年9月5日 単位：mV
($1 \text{ mV} = 14.3 \text{ mW/cm}^2$)

全天日射量 / 散乱日射量
快晴 5.7 / 0.7

晴 5.2 / 2.2

曇 2.2 / 2.2

Fig. 2 ケヤキの樹影内地表面における天気の別の日射量分布。

単位: mV

(1 mV = 14.3 mW/cm²)

(IV) 日射量の垂直分布

日射量の垂直分布の測定結果を Fig. 4 に示してある。図中、点線は太陽光線の照射角を示してある。本図から、樹冠直下で、かつ樹冠部に近づくほど日射の減少率が大きいことがわかる。この理由としては、樹冠部に近づくに従って、樹冠による天空の遮蔽率が大きくなり、天空からの全天日射は遮蔽される一方、散乱日射の減少量も増加するためと考えられる。

快晴: 気温 32.0 °C

晴: 気温 28.0 °C

曇: 気温 29.0 °C

Fig. 3 ケヤキの樹影内外のソルエア温度分布。

(2) キンモクセイについて

(I) 日射量の日変化

キンモクセイの樹影内地表面における日射量分布の日変化の測定結果は Fig. 5 に示してある。

樹幹、樹冠および樹形の外形などは、ケヤキの場合と同様に表してある。また、測定日時が同じであるので、全天日射量と散乱日射量の日変化も、ケヤキのものと同じである。

樹影内の日射量は、量小値の部分で、9時～12時までは、0.2 mV (2.9 mW/cm²) 13時～16時までは、0.3 mV

全天日射量 / 散乱日射量

9 : 00 4.8 / 0.7

10 : 00 5.0 / 0.7

11 : 00 5.5 / 0.7

12 : 00 5.7 / 0.7

13 : 00 5.3 / 0.7

14 : 00 4.7 / 0.7

15 : 00 3.7 / 0.7

14 : 00 2.4 / 0.6

Fig. 5 キンモクセイの樹影内地表面における日射量分布の日変化。
測定日 : 1986 年 9 月 4 日
単位 : mV (1 mV = 14.3 mW/cm²)

(4.3 mW/cm^2) である。最大値の部分では、9時～15時までは、 0.5 mV (7.2 mW/cm^2) 16時に、 0.6 mV (8.6 mW/cm^2) である。これを日射量の最小値の部分での樹影内日射到達率であらわすと、9時で約4.2%，12時で約3.5%，16時で約12.5%となる。これは、ケヤキの値と比較して、約30%小さくなっている。

樹影内の日射量分布をみると、ケヤキよりもキンモクセイの方が中心に向かっての減少の割合が大きく、樹幹付近での値を比較すると、おおよそ 0.1 mV 程度小さくなっている。このような傾向は、測定した全時刻を通じて同様の結果である。

樹影内日射量分布の経時変化は、ケヤキと同様、非常に少なく、午後0.1 mV程度大きくなるのみであり、ケヤキの結果と良く一致した傾向がみられる。

なお、キンモクセイの測定により記録された最小値の 0.2 mV をエネルギーに換算すると、 2.9 mW/cm^2 となり、これは、齊藤(1977)らにより示されている平均的な夜間輻射よりもはるかに小さな値になる。

(II) 天気による差異

Fig. 6 キンモクセイの樹影内地表面における天気別の日射量分布
単位: mV ($1 \text{ mV} = 14.3 \text{ mW/cm}^2$)

ケヤキの場合と同様に正午における天気別の樹影内日射量分布を比較したものを Fig. 6 に示してある。

全日射量と散乱日射量は、ケヤキと同じである。

樹影内日射量は、最小値の部分で、快晴、 0.2 mV (2.9 mW/cm^2) 晴、 0.4 mV (5.7 mW/cm^2)、曇、 0.4 mV (5.7 mW/cm^2) となっている。これを樹影内日射到達率であらわすと、快晴: 3.5%，晴: 7.7%および曇: 14.8%，である。到達率は快晴時に最小であり、晴、曇の順に大きくなり、ケヤキの場合と同じ傾向である。しかし、その値は、いずれの場合もキンモクセイの方が小さい値を示している。これは、樹冠の枝葉による遮蔽量による相違と解せる。すなわち、ケヤキの項で述べたように、樹冠による天空の遮蔽が大きい樹木であるキンモクセイの方が、より大きな日射軽減効果を示しているのである。

(III) 緑陰の温熱環境評価

Fig. 6 の測定結果をもとに、樹影内および日照地のソルエア温度を算出した結果は Fig. 7 に示してある。

樹影内外のそれらの値を比較すると、快晴時 30.3°C 、

Fig. 7 キンモクセイの樹影内外のソルエア温度分布

晴天時 26.5℃, 曇天時 12.7℃と, ケヤキの測定結果同様, 天気の違いにもとづく温度の差異が明白に示されている。その理由はケヤキの項で述べた内容と同様であるが, このような測定を通じて, 樹木による緑陰効果が立証されたものと言える。

4. 総合考察

(1) 日射量の日変化

日射量の日変化は, 調査されたケヤキおよびキンモクセイとも, ほとんど同じような傾向を示し, 正午を中心とした日中に, 樹冠による緑陰効果が特にみられている。すなわち, 日射の減少率をみても, 特に正午前後に著しく, 樹影内の日射量は, 夜間輻射と同じレベルまで減少することもあり, 樹木の日射軽減効果は大きいものと言える。

単木を対象に, このような測定を行った類例は, 前述したように見あたらないが, 樹林内の日射については, 他の分野において, 比較的研究されているので, ここでは, それらとの比較を行ってみる。

まず, 夏期における樹林内の日射の透過率については, 樹高, 密度, 樹種, 太陽高度などとの関連で, さまざまな研究がなされている。

例えば, 吉野(1970)¹⁹⁾によると, 樹冠部では, 日射の約80%が吸収され, 林内の地表に達するのは約5%であると言う。

また, Monteith(1975)⁸⁾によると, 着葉したカシ林の樹冠を透過する日射量は, 樹令30~50年の林で, 12~13%, 樹令140~180年の林で, 23~27%であると言う。

さらに, Oke(1978)¹³⁾によると, 植物群落を通過する日射量は, さまざまな要因の影響を受けるが, 一般的に言って, 20%以下, 場合によっては, 5%以下と示されている。

このように, 対象とする樹林の違いにより, さまざまな値が示されているが, 今回の測定結果により示された快晴時の単木による樹影内日射到達率3~5%の数値は, 一般的な温帯の樹林と同程度の数値を示しているものといえる。

つぎに, 日変化については, 夏期における樹林内の日射量は正午に最大値を示すことが知られている。⁹⁾しかし, 今回の測定結果では, 最大値は, 最も太陽高度が低くなった16時に現れた。これは, 単木の場合, 太陽高度が低く, 影が長く伸びた状態では, 樹影の位置が, 樹冠下から大きく外れて存在することになり, 樹影内に置いた日射計に対して, 樹冠の相対位置が正午時とは変化してしまうことになる。そのため, 樹冠による天空の遮蔽量が減少すると共に, 散乱日射の到達率が増加するためと考えられる。散乱日射量は, 16時でも正午とほぼ同じ値を

示すので, 影響は大きい。一方, 樹林の場合は, 樹冠部が連続しており, 日射計に対して常に一定の遮蔽率を保つために, このようなことは起こらずに, 全日射量の日変化に同調した変化を示すものと考えられる。

(2) 天気による差異

天気別による日射量の差異の測定結果からは, 樹冠による日射軽減率が快晴時に最大であり, 晴, 曇の順で小さくなっていること。また, ケヤキとキンモクセイでは, キンモクセイの方が, いずれの天気の場合でも軽減率が大きいことが明らかになった。特に曇や晴の際には, その差が顕著になる。その理由として, ①樹影内の日射量は, 全日射量よりも, 散乱日射量の値に影響される。②樹冠による天空の遮蔽率の大きな樹木ほど散乱日射の減少率が大きいこと, 等に起因した現象によるものと解せる。従って, 本測定結果からわかるように, 樹冠が低く広く張った, 天空の遮蔽率のより大きなキンモクセイの方が, 日射軽減率が大きく, また, 比較的, 散乱日射量の少ない日, すなわち一般的に天気の良い日ほど, 樹木による日射遮蔽効果が大きくなるものと言える。

以上の結果から, 緑陰樹として適当な樹木は, 樹冠が広く張り, 十分に枝葉が密生するものということになる。また, Fig. 4から分かるように, 樹冠部に近い位置程, 遮蔽効果が大きいので, 樹冠下の利用に支障の無い範囲で, 下枝位置が低い方が緑陰効果が大であると言える。また, 単木として, このような樹形の条件を満たしていなくとも, 樹林状に植栽すると, 樹冠部が連続し, したがって, 遮蔽率が上がることになるので, より一層の緑陰効果を期待することができるものと考えられる。

(3) 緑陰の温熱環境評価

ケヤキとキンモクセイのソルエア温度を比較すると, 快晴時には, ほとんど数値に差異が認められないが, 晴や曇では, 樹影中心部において, キンモクセイの方が2~3℃低くなっている。そこで, キンモクセイの樹影の方が, 天気条件にかかわらず, 常に高い緑陰効果が期待し得るものと言える。一方, ケヤキの方は, 晴や曇の天気のように, 散乱日射量が多い条件下では, キンモクセイのような, 樹冠の広がり大きい樹木に比較して, その効果がより小さくなる傾向にある。

5. 総 括

樹木による日射軽減効果を明らかにするために, 夏期を中心にケヤキとキンモクセイの単木を用いて, 樹影内外の日射量分布の測定を行った。その結果, 次のようなことがわかった。

①快晴の場合, 9時~16時の間, 全日射量は34.3~81.5 mW/cm²まで大きく変化しているのに対し, 樹影内の日射量は, ほとんど同じ値を有し, その絶対値は, 測定対象の両樹木の場合, キンモクセイで, 2.9 mW/cm²,

ケヤキで4.3 mW/cm²程度であり、夏期の平均的な夜間輻射量と同じ値、あるいは、やや小さい値になる。

②樹木の樹冠による日射軽減率は快晴時に最大であり、晴、曇の順に小さくなる。また、樹影内の日射量の絶対値をみると、ケヤキ、キンモクセイともに、快晴で最小、晴、曇の順に大きくなる。そして、全天日射量に対する樹影内日射量の割合を樹影内日射到達率として、正午における値を日射量最小の部分で比較すると、快晴時、ケヤキで5.3%，キンモクセイで3.5%，晴のとき、ケヤキで13.5%，キンモクセイで7.7%，曇のとき、ケヤキで40.9%，キンモクセイで14.8%，となる。

③今回測定した範囲では、樹冠が広く低く張った樹木ほど、日射軽減効果が大きい傾向にあった。そのような樹木では、快晴時の正午前後、樹影中心部で、日射を3～5%程度にまで減少させる。樹影周辺ではやや増加し、10%位になる。

④快晴時におけるケヤキの日射量の垂直分布の測定結果から、地表面近くよりも、樹冠直下で、かつ樹冠部に近づくほど日射の減少率が大きい。

⑤樹影内外のソルエア温度(SAT)を比較すると、快晴時に、約30℃の差がみられ、樹冠による日射軽減効果が明白に認められる。

以上の結果から、樹種、天気等の条件により差異は認められるものの、夏期の樹木による日射軽減効果の大きさが把握された。

今後、樹種、樹形、樹冠密度、植栽形態などの差異にもとづく、より詳細な同様の研究を進めていく必要があるが、このような成果をふまえ、公園、街路樹などの植栽計画にとどまらず、都市緑化計画の一環として、市街地等における緑陰樹の適正配置計画等を検討することが必要となる。

なお、本研究を進めるにあたって、御助言等頂いた千葉大学園芸学部農業気象学研究室の皆様には謝意を表したい。

引用および参考文献

1) 米国内務省国立公園局・米国造園家協会編

G.O. Robinette 著：三沢彰，山本正之共訳：図説

・生活環境と緑の機能，68—72，産業技術センター（1978）

2) L. T. Evans: Environmental Control of Plant Growth, 82—83, ACADEMIC PRESS (1963)

3) E. Grandjean, 洪悦郎他訳：住居と人間，170—175，人間と技術社（1978）

4) 羽生寿郎他：農業気象学，15—17，文永堂（1984）

5) 堀口郁夫：人工光源などの弱光量測定時における日射計の特性：農業気象，31—（4），171—176（1976）

6) 気象ハンドブック編集委員会編：気象ハンドブック 450—452，朝倉書店（1979）

7) 近藤三雄他：樹木、芝生の微気象調節効果に関する実証的研究，造園雑誌，46（3）：161—175（1983）

8) J. L. Monteith: Vegetation and the Atmosphere, 1—2, 179—180, ACADEMIC PRESS (1975)

9) R. E. Mum: Descriptive Micrometeorology, 155—166, ACADEMIC PRESS (1966)

10) 新田伸三他：環境緑化における微気象の設計，117—120，鹿島出版会（1981）

11) 農業気象ハンドブック編集委員会編：新編・農業気象ハンドブック，206—212，710—711，養賢堂（1977）

12) 岡崎文彬：造園の歴史 I，14—15，同朋舎出版（1981）

13) T. R. Oke: Boundary Layer Climate, 315—318, METHEN & CO LTD, (1978)

14) V. Olgyay: Design with Climate, 74—77, PRINCETON UNIVERSITY PRESS (1963)

15) N. J. Rosenberg: Microclimate, 71—74, A Wiley—Interscience Publication (1983)

16) 斎藤平蔵：建築気候，19—20，共立出版（1977）

17) 佐々木隆：健康と気象，35，朝倉書店（1982）

18) 内嶋善兵衛：日射の測定法，農業気象37（2）137—138（1981）

19) 吉野正敏：小気候，124—125，地人書館（1970）（1987.7.11 受付，1987.9.11 受理）

Summary: One of the most important part of trees in parks and gardens is to make comfortable shade for the visitors in summer.

In the shade of the tree, heavy radiant energy is extremely reduced.

In this investigation, we tried to measure the decrement of the solar radiation under the isolated trees such as Japanese Zelkova (*Zelkova serrata*) and Chinese Sweet (*Osmanthus fragrans var. auranticus*) and calculated the effect of the shade of the trees.

The result is summarized as follows:

- 1) During the daytime (9h ~ 16h) of on clear weather at the summer, the flexes of the solar radiation measured in the shade of the trees are almost stable, and the values of radiant energy are $3\text{mWcm}^2 \sim 6\text{mW/cm}^2$.
- 2) The decrement of the flexes of the solar radiation shows the maximum value on clear, and fairly weaken on cloudy.
The transmissivities of radiant energy through the canopy at 12h are about
4 ~ 5% on clear
8 ~ 13% on fine and
15 ~ 40% on cloudy.
A difference of the transmissivities between both trees remarkably increases on bad weather.
- 3) A tree which has a large and wide canopy shows strong effect.
The radiant energy is decreased in $3 \sim 4\text{mW/cm}^2$ by the tree.
This value in summer is weaker than the flexes of average groundradiation.
- 4) If we indicated it by using SAT (sol-air temperature) index, the effect of trees shade registered 29.8°C lower in the shade than out.