アトリウム空間における快晴日の透過光量子量、
光合成速度シミュレートによる植栽樹木の生育評価中村彰宏¹・小杉緑子²・森本幸裕²

摘要：関西旅客ターミナルビルのアトリウム空間を対象に、アトリウムの構造、トップライトの透過特性、太陽位置、屋外の光量子量の推定値を用いて、快晴日の透過光量子量を算出するモデルを作成した。算出値は、アトリウム内で得られた実測値の日および季節変化を良好に再現した。アトリウム植栽樹木、屋外の植栽樹木、室内に生育する観葉植物の光合成、呼吸速度の実測値と、このモデルによる透過光量子量から、アトリウムへ導入した植物の生育特性評価を行うために、成長量の指標となるCO₂収支を個葉レベルで算出した。またアトリウムの天井高、植栽場所を変化させた場合の透過光量子量およびCO₂収支も算出した。観葉植物のCO₂収支は、植栽場所やアトリウムの構造から受ける影響が少なく、低光量条件下での植栽利用が容易と考えられた。いっぽう、低光量条件下で順化したモッコク、カラタネオガタマでは、CO₂収支の変化が大きいため、アトリウム構造や植栽場所を十分検討してから、緑化に用いる必要があると考えられた。

キーワード：アトリウム、室内緑化、透過光量子量、光合成速度、シミュレーションモデル、生育評価

Nakamura, Akihiro, Kosugi, Yoshiko and Morimoto, Yukihiro : Evaluation of growth characteristics of trees in an atrium using a simulation model of transmitting PPFD and photosynthetic rate on clear days

Abstract: A simulation model to estimate the transmitting PPFD in the atrium of passenger terminal building at Kansai International Airport was developed using factors as the structure of the atrium, transmitting characteristics of top light, solar location and simulated outdoor PPFD on clear days. Estimated PPFDs were consistent with daily and seasonal observed fluctuations in the atrium. With observed net photosynthetic and respiration rate and estimated transmitting PPFD, CO₂ budgets in atrium environment of trees grown in the atrium, trees grown outdoors and two foliage plants grown indoors were estimated at the leaf scale to evaluate the growth characteristics. Effect of the ceiling height and planting location on the transmitting PPFD and CO₂ budgets of the leaves were also estimated. Since CO₂ budgets of foliage plants were insensitive to the atrium structure and planting location, foliage plants seemed to be easily used under low light environment. On the other hand, CO₂ budgets of *Ternstroemia gymnanthera* and *Michelia figo*, which are generally planted outdoors and acclimated in the low light environment in the atrium, were sensitive to these conditions. It is conceivable that careful consideration of the atrium structure and planting position is necessary for the use of these outdoor trees in the atrium.

Key words: atrium, indoor planting, transmitting PPFD, photosynthetic rate, simulation model, growth evaluation

1. はじめに

アトリウムとは「古代ローマ都市の住宅における主要広間」²⁰⁾であったが、近年は「屋根の架かった前庭や中庭のこと。特にガラス屋根などにより十分な自然採光を確保した広場状の空間」²⁰⁾や「ガラス屋根などを通して上方からの光が射し込む巨大な吹き抜け空間」¹⁹⁾などとも定義される。オフィスビルをはじめ、ショッピングセンターや公共施設などの大型建築の玄関ホールやコア部分に、しばしばアトリウムがシンボリックに配置される。アトリウム空間は、太陽光などの屋外的環境要素を十分取り入れることで刺激的かつ快適であり、都市空間に新たなアメニティを提供している¹⁹⁾。

一般にアトリウムは閉鎖空間であることが多いため、明るく大きな採光の設計は、透過日射量を増加させ、室内温度の

上昇による空調負荷の増大を招く恐れがある。そこで建築分野では、アトリウムでの熱環境評価として温度や照度、日射量実測^{17,26,31)}、透過日射量のシミュレーション²⁾、模型実験による冷房時の熱・空気流動性状の検討¹⁴⁾など多くの研究が行われている。また、人々の視環境を対象として物理量である昼光量から、空間の印象や、リフレッシュ空間の適性を予測する研究もなされている²³⁾。しかし建築分野において、植物の生育のための環境評価や環境設計に関する研究はない。

従来、室内空間の緑化には熱帯地方原産の観葉植物がしばしば用いられ、観葉植物を対象にアメリカなどで、光補償点からみた低光量条件下での光順化の評価^{7,8)}、光量や照射時間、施肥が生育に与える影響⁵⁾、光量と肥料濃度が光補償点に与える影響⁹⁾などについて多くの研究が行われている。わが国では園芸分野で、弱光下における観葉植物の葉の構造や光合

¹ 大阪府立大学大学院農学生命科学研究科, Grad. Sch. of Agric. and Biol. Sci., Osaka Pref. Univ.

² 京都大学大学院農学研究科, Grad. Sch. of Agric., Kyoto Univ.

成速度の変化^{27,28)}などについての研究が行われている。これらの研究材料としてはベンジャミナ (*Ficus benjamina* L.) がしばしば用いられ、この樹種は小規模な室内に限らず、アトリウム空間でも高木類として植栽されている¹²⁾。

アトリウムは大規模な空間であるため、小さな観葉植物などのポットを用いた緑化では景観に与えるインパクトが小さく、大型の樹木を用いた緑化が必要と考えられる。それゆえ、わが国では、従来、屋外の造園緑化で用いられてきた樹種がアトリウムに植栽されることがある。わが国における最初で最大規模のアトリウム緑化事例¹¹⁾でも日本原産の常緑樹木が用いられ、植栽樹木の生育状況、気象や土壌環境が報告^{20,21)}されている。近年、アトリウム緑化に用いられた樹種について、異なる光環境下に生育する樹木の光合成特性の相違¹⁶⁾、アトリウム空間の微気象環境と蒸散・光合成速度について¹⁵⁾の報告はあるものの、アトリウム緑化に関する情報は非常に少ない。

アトリウム緑化計画の植栽樹種選定では、従来、生育可能な最低照度が記されているリストを参照できるが¹³⁾、屋内照度の評価方法が未記載のマニュアル³²⁾もある。開口部の小さなアトリウム空間では光環境の日変化および季節変化が大きく、光環境評価は非常に困難である。光合成特性はこの光環境に大きく依存するため¹⁵⁾、植物の生育に重要な光環境を必ずしも考慮したアトリウム緑化が行われているとはいえない。

そこで本研究は、アトリウム植栽樹木の生育に大きな影響を与える光環境と緑化植物の生育状況を評価することを目的とした。既存のアトリウム空間での光量子量の実測値をもとに、快晴時の透過光量子量シミュレーションモデルを作成した。このモデルで算出した透過光量子量と、個葉レベルで実測した光量と光合成速度の関係から、二酸化炭素収支量を算出し、生育特性を評価した。またアトリウムの構造や植栽場所を変化させた条件で透過光量子量および二酸化炭素収支量を算出し、アトリウムの構造が光環境および植物の生育特性に与える影響も考察した。

2. 観測地および調査方法

2.1 観測地の概況

観測は、大阪府泉佐野市と泉南市にまたがって建設された関西国際空港旅客ターミナルビル内のキャニオンと呼ばれるアトリウム空間で行った。このアトリウム空間は、長辺が約275 m、短辺が約27 m、高さが約27 mである。旅客ターミナルビルの長辺は、滑走路に平行しており、南北軸から51度偏向している。図-1にアトリウム空間の平面図を示す。天井部には図-1(a)のようにトップライトが設けられている。トップライト部には、可視光域で約75%の透過率を持つ2枚のガラス(厚さ8 mmおよび6.8 mm)から構成される複合ガラスが用いられ、開港直後にはその上部全面に厚さ1.5 mm、開口率が約40%の小孔を持つステンレス製のパンチングメタルが設置されていた。アトリウム空間の2階および4階部分には、長辺を横切るように幅約10 mの通路が存

図-1 アトリウム空間の平面図 (a: 天井部におけるトップライト, b: エレベーターおよび2,4階の通路部, c: 床面における植栽柵, 数字は植栽柵番号を示す)

Fig. 1 Horizontal sections of the atrium. (a): toplight at ceiling, (b): presence of elevator and bridge at 2nd and 4th floor, (c): planting container at 1st floor. Symbols "1" to "34" indicate the numbers of planting containers.

在する。長辺の北西側にはエレベーターおよびその踊り場が存在する(図-1(b))。このアトリウム空間の1階部分の長辺のやや南西寄りに、およそ4 m×4 m、深さ約1 mの植栽柵が設置された(図-1(c))。珪藻土焼成粒を培養土として、北東および南西のエンドウォール近くにはモウソウチクが、それ以外の植栽柵には主として日本原産のモッコク、モチノキなどの15樹種が開港時に植栽されていた²²⁾。なおこの植栽柵の中心には噴霧装置が付属するポールが設置されている。

2.2 光環境および光合成、呼吸速度測定方法

アトリウム空間の南西のエンドウォールから約60 mに位置する7番目の植栽柵(図-1(c)および図-7)の中心にある噴霧用ポールの上、高さ約7 mに設置した光量子計(英弘精機製, ML-020P)で光合成有効光量子束密度(以下、光量子量とする)を、熱電対式温度センサーで室内温度(以下室温とする)を、データロガー(ESD製, GK-100)とパーソナルコンピュータでおよそ30分ごとに測定、記録した。

植栽樹木の光合成速度は、植栽後およそ4年経過したモッコク (*Ternstroemia gymnanthera* Bedd.), カラネオガタマ (*Michelia figo* Sprengel) の切り枝を対象に¹⁶⁾、1998年7月から1999年3月にかけてアトリウム空間で携帯式光合成蒸散速度測定装置(LI-COR社製, LI-6400)を用いて測定した。以下、この2種の樹木をアトリウム植栽樹木とする。アトリウム植栽樹木と比較評価するために、観葉植物および屋外に生育する樹木の光合成速度も測定した。観葉植物として、大阪府立大学の太陽光がほとんど入らず、日中の光量子量が蛍光灯による $6 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 程度の光環境下にある室内で5年以上生育するスパティフィラム (*Spathiphyllum* sp.), 同程度の室内光量環境に移植後およそ3カ月のパキラ (*Pachira aquatica* Aubl.) を対象とした。これら2種を以下、観葉植物とする。屋外環境に生育する樹種として、大阪府立大学構内に植栽されたモッコク、カラネオガタマを対象とした。これら2種を以下、屋外に生育する樹木とする。アトリウム植栽樹木と同様に切り枝を用いて同一環境下で測定した。計測器に付属するLEDを光源として、600, 300, 100, 50, 25, 10, 0 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の光量子量下で純光合成速度を

測定した。また付属のペルチェ冷却素子で葉温を変化させ、およそ18℃から30℃における暗呼吸速度を測定した。

2.3. 光シミュレーションモデル

2.3.1 概要

本研究で用いたシミュレーションモデルでは、快晴日の屋外の光量子量を推定し、計算時間ごとに天井での太陽位置を求め、日射の散乱および直達成分の透過量を別々に算出する。そのフローチャートを図-2に示す。アトリウム空間の光環境評価では、透過光が考慮すべき面（点）に直接影響を与える直接照度と、壁面や床面などの表面における光の相互反射によって生じる間接照度が考慮される。しかし、間接照度の計算予測は難しいため¹⁹⁾、本研究では間接光の算出は行わなかった。計算対象地は、実測値が得られた植栽柵7番のポール上部の光量子計設置場所（アトリウム南西端からおよそ60 m、高度約7 m）とした（図-1(c)、図-7）。

2.3.2 屋外の光量子量

天空上の太陽位置は、太陽高度（ h ）と太陽方位角（ α ）とで表現される。

$$\sin h = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos t \quad (1)$$

$$\cos \alpha = (\sin h \sin \phi - \sin \delta) / \cos h \cos \phi \quad (2)$$

ϕ は緯度、 δ は日赤緯、 t は時角である。地表面上に到達する日射量は、太陽から直接到達する直達日射量と大気中で散乱された後に到達する散乱日射量に分けられる。直達および散乱光別に、大気透過率や混濁係数、可降水量、雲量、太陽高度、地球と太陽との距離などをパラメータとして日射量の推定が行われる²⁵⁾。本研究では、アトリウム空間の透過光量の算出、植栽樹木の生育特性評価が目的であるため、屋外の光量子量（ PPFD_{out} ）の推定は、上述のパラメータの影響を省略し、次式で行った。

$$\text{PPFD}_{\text{out}} = K \sin h \quad (3)$$

図-2 シミュレーションモデルのフローチャート

Fig. 2 Flow chart of the simulation.

ここで K は定数、 h は太陽高度である。

2.3.3 散乱光成分の透過

各時間ごとに天井部での太陽位置を求め、太陽位置がトップライト部にはない場合には、散乱日射成分のみによる光量子量（ $\text{PPFD}_{\text{in-dif}}$ ）を、係数 s を用いて次式で求めた。

$$\text{PPFD}_{\text{in-dif}} = s \cdot \text{PPFD}_{\text{out}} \quad (4)$$

なお、日射の直達と散乱成分の比率は、日時によらず一定と仮定した。快晴日の全天日射量に対する散乱日射量の比率が一定、天空輝度が一定と仮定すると、散乱日射量の比率と半球面におけるトップライト部の立体角投射率（全天空の水平面上の正射影の面積に対する実際に見える天空部分の正射影の面積の比¹⁸⁾）でもある形態係数の積が、係数 s になると考えられる（ $s=0.0217$ ）。しかし、ガラス上部に設置されたパンチングメタル、ガラス面の汚れを考慮した保守率などの影響があり、推定値が実測値を大きく上回ったため、屋外の光量子量の推定値とアトリウム内の実測値から s を逆算した。1日を通して直達成分の透過しない冬季の快晴日の4日間のデータから、 $s=0.0121$ の値を得た。

2.3.4 直達光成分の透過

太陽位置がトップライト部にある場合には、前述の散乱日射の透過量に加え、直達日射の透過量（ $\text{PPFD}_{\text{in-dir}}$ ）を算出した。光量子計を設置した7番の植栽柵直上のトップライト部および5, 6番の植栽柵の直上のトップライト部に太陽位置がある場合には、光量子量の実測値は大きかった。しかし3, 4番の植栽柵上部のトップライト部に太陽位置がある場合には、光量子量の増加はほとんどなかった。それゆえ、計算対象地での直達日射が透過する有効なトップライト部分は、7番および5, 6番の植栽柵直上のものとした。なお2つのトップライト部間の梁は、直達日射をさえぎるが、計算の簡略化のために便宜上トップライト部として計算した。トップライト部の2枚のガラスの透過率、反射率はほぼ同じであり、入射角との関係を図-3に示す。2枚まとめた複合ガラスの透過率（ $\tau(i)$ ）は、ガラスの多重反射があるため、入射角 i （ $i=90-h$ ）に対する透過率 $Tr(i)$ および反射率 $Rf(i)$ から次式で表される。

$$\tau(i) = Tr(i)^2 \cdot (1 / (1 - Rf(i)^2)) \quad (5)$$

しかし、散乱光の場合と同様に、パンチングメタルの影響やガラスの透過、拡散性、保守率などが複雑に影響するため、透過率のみをパラメータとして算出した透過光量子量は、実測に比べ過大評価された。そこで直達成分の透過光量は係

図-3 ガラスの入射角と透過率、反射率の関係

Fig. 3 Relationship between incident angle and transmittance, reflectance.

数 d を用いて次式で算出した。

$$\text{PPFD}_{\text{in-dir}} = d \cdot \tau(i) \cdot \text{PPFD}_{\text{out}} \quad (6)$$

係数 d は図-4 にみられるように入射角によって変化すると考えられ、入射角の関数として次式で透過光量子量を算出した。

$$\text{PPFD}_{\text{in-dir}} = d(i) \tau(i) \cdot \text{PPFD}_{\text{out}} \quad (7)$$

なお、 d の関数は快晴日 22 日間の日中のデータを線形回帰して求めた ($d = 0.0019i - 0.0346$, $r^2 = 0.498$)。

2.3.5 アトリウム内の光量子量

そして最後に、計算対象地の透過光量子量 (PPFD_{in}) は、散乱成分と直達成分、照明による光量子量 ($\text{PPFD}_{\text{in-l}}$) の和として次式で算出した。

$$\text{PPFD}_{\text{in}} = \text{PPFD}_{\text{in-dif}} + \text{PPFD}_{\text{in-dir}} + \text{PPFD}_{\text{in-l}} \quad (8)$$

3. 結果と考察

3.1 光量子量の季節変化

図-5 に 1994 年 8 月 26 日から 1995 年 6 月 30 日までの屋外 (上段) とアトリウム内 (下段) の光量子量の経時変化を示す。屋外の光量子量は、関西空港から約 40 km 離れた大阪管区気象台で測定された日射量 (地上気象観測時日別データ: 気象庁提供) から算出した。日射量から光量子量への変換には、換算定数 ($1 \text{ W m}^{-2} (400 \sim 700 \text{ nm}) = 4.57 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

図-4 入射角と係数 d の関係

Fig. 4 Relationship between incident angle and coefficient of “ d .”

図-5 屋外およびアトリウム空間内の光量子量の経時変化 (a: 屋外, b: アトリウム空間内)

Fig. 5 Seasonal change in observed PPFD outdoors (a) and in the atrium (b).

s^{-1}) および日射量 (H) における光合成有効日射量 (H_{PAR}) の割合 (清野²⁴) を参考に $H_{\text{PAR}}/H = 0.49$ と仮定) を用いた。屋外における晴天日の光量子量の最大値は、夏季で約 $2,000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、冬季で約 $800 \sim 1,200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ と季節変化した。一方、アトリウム空間では、夏季の最大値は約 $160 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ であった。12 月および 1 月に $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 程度の光量子量が観測されたが、太陽高度の低い 15 時頃の隣接するビルのガラス面からの反射光の影響であり、これらの値を除くと、トップライト部からの入射光および照明による光量子量の冬季の最大値は約 $15 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ であった。日中の屋外に対するアトリウム空間内の光量子量の最大比率は、夏季で約 8%, 冬季では約 2% であった。屋外の光量子量の最大値は、冬季には夏季の 6 割以下に減少するが、アトリウム空間では、冬季には夏季の約 1 割となり、季節変化が大きい特徴がみられた。

3.2 屋外の光量子量推定

図-6 に天候が良好だった 4 日間の日中の屋外での実測および算出した光量子量の日変化を示す。1995 年 5 月 18 日および 1996 年 12 月 22 日では実測値と算出値がほぼ一致しており、光量子量の推定が良好に行われた。しかし、大気透過率の変

図-6 実測および算出した屋外の光量子量の日変化 (太線: 実測, 細線: 計算)

Fig. 6 Comparison between observed (bold) and estimated (fine) diurnal changes in PPFD outdoors.

図-7 天井部における太陽位置の変化 (①～⑦: 植栽枡の番号, 田: トップライト, 黒: 連絡通路)

Fig. 7 Change in locations of solar at ceiling. ① - ⑦ indicate the numbers of planting container, 田: toplight, 黒: bridge.

図-8 実測および計算した透過光量子量の日変化 (□：実測，—：計算)

Fig. 8 Comparison between observed (□) and estimated (—) diurnal changes in transmitting PPFD.

図-9 快晴日とした各月 22 日の透過光量子量の日変化

Fig. 9 Diurnal changes of transmitting PPFD on 22nd day of every months estimated with clear sky condition.

化等を考慮しなかったため、1996 年 10 月 29 日では過大評価され、いっぽう 1996 年 4 月 22 日では過小評価された。4 日間で両者の差が最も大きかった 1996 年 4 月 22 日 12 時 20 分の絶対および相対誤差は、 $119 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、6.0% だった。

3.3 天井部における太陽位置

光量子計からおよそ 20 m 上方の天井部での太陽位置を太陽高度および太陽方位から算出した (図-7)。以下、春分、夏至、秋分、冬至が、それぞれ 3, 6, 9, 12 月の 22 日と仮定する。太陽高度の最も高い 6 月 22 日 (夏至) には、光量子計の最も近くに太陽位置がある。トップライト部に太陽位置が存在する時間帯は、およそ 11 時から 12 時 30 分である。一方、3 月 22 日 (春分、秋分である 9 月 22 日も同様) の太陽位置は、夏至に比べ光量子計からやや離れる。トップライト部に位置する時間帯はおよそ 11 時からであるが、14 時頃までと夏至より長かった。12 月 22 日 (冬至) には、光量子計から太陽位置が大きく離れ、3, 4 番の植栽柵上部のトップライト部をかすめるだけであった。ただし前述のとおり、3, 4 番の植栽柵上部のトップライト部からの直達透過光は、光量子計設置場所の透過光量子量にほとんど影響を及ぼさなかった。11 月 10 日 (2 月 4 日も同様) には、光量子計への照射に対して有効な 5, 6 番の植栽柵上のトップライト部南端境界付近を太陽位置が通過する。それゆえ 11 月 10 日から 2 月 4 日ころまでは、直達光が透過しないと考えられる。

3.4 アトリウム空間の光量子量の推定

図-8 に、1994 年 8 月 26 日から 1995 年 6 月 29 日までの、ほぼ快晴日と考えられる 10 日間の光量子計設置位置での透過光量子量の計算値と実測値を示す。秋分のころの 9 月 26 日では、計算値に比べ実測値の方がやや早く 10 時ころから増加し、両者に若干の相違がみられたが、午後の減少時はおおむね一致した。このモデルではトップライト間の梁の遮光の影響を考慮していないため、9 月 26 日の 12 時ころの計算値は、実測値のように一時的に減少しなかった。11 月 20 日、12 月 23 日では、図-7 の太陽位置からわかるように、日中の光量子量の大きな増加はなかった。12 月 23 日には、前述のとおり、15 時ころにガラス壁面からの透過光により、 $34 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の光量子量が実測されているが、壁面からの透過はこのモデルで考慮していないため、実測値と計算値に相違が生じた。4 月 4 日では、午前中の光量子量増加時に両者の値が一致したが、13 時以降に実測値がやや計算値を下回った。4 月 20 日から 6 月 29 日までは、両者の増加時および減少時の対応は良好であった。ただし、実測値は計算値と比べ 5 月 6 日では $33 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 大きく、6 月 29 日では $24 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 小さいという相違が生じた。10 日間の誤差は、ピーク時、増加時および減少時、トップライト間の梁の影響を受ける時間に生じたが、その値は $33 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 以下と小さく、おおむね計算値は実測値を再現し、このモデルは快晴日の透過光量子量を良好に再現することが明らかとなった。

3.5 快晴日の透過光量子量の季節変化

太陽高度が最低の冬至から最高となる夏至までを対象に、各月の 22 日が快晴と仮定し、アトリウム空間の光量子計設置場所で算出した透過光量子量の日変化を図-9 に示す。12 月と 1 月には、1 日を通して直達成分の照射はみられなかった。2 月以降には直達成分の照射がみられ、日中のピーク値は 2 月から 6 月にかけて増加したが、直達成分の照射する時間は、逆に 3 月から 6 月にかけて減少した。

図-10(a) に実測およびモデルで算出した、各月 22 日を快晴と仮定した日平均透過光量を、図-10(b) に 7 時から 19 時までの 12 時間平均透過光量子量の経日変化を示す。モデル

で算出した日平均光量子量の最大値は、12月には $6 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、4月には $21 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であった。図-9中の透過光量子量のピーク値は、太陽高度の最も高い6月22日にみられたが、日平均透過光量子量は4月22日に最大であった。太陽の軌跡にみられるように、本アトリウム空間では3月、4月におけるトップライト部分を太陽位置が通過する時間、つまり、直達成分の照射する時間が6月に比べて長いために生じたと考えられる(図-7)。日および12時間平均光量子量の計算値は、おおむね実測値の最大値と一致しており、これからのモデルの推定が良好に行われていることがわかる。このアトリウム空間で実測された日平均光量子量は12月におよそ $6 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、5月の日平均光量子量は $3 \sim 23 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、12時間平均光量子量は $4 \sim 42 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ と変化した。両者ともに冬季の変動は大きくないが、5、6月の日平均光量子量はおよそ5倍に、12時間平均光量子量は7倍以上に変動した。5、6月における $5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 程度の平均光量子量は悪天候日に生じたと考えられる。アトリウム緑化の植栽樹種選定には、生育に必要な最低照度(12時間平均照度)が目安とされるが¹³⁾、12時間平均光量子量は、季節および天候によっても大きく変動する(図-10)。透過光質が太陽光と同じと仮定し(ガラスの透過率は300~700 nmの波長域でおおむね75%である)、光量子量を照度に変換すると($1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} = 54 \text{ lx}^{-1}$)、6月でもこのアトリウムの12時間平均照度の最低値は、238 lxとなる。生育可能な植物種リスト¹³⁾の中で、最も耐陰性が高いと考えられる *Hedera helix* や *Schefflera arboricola* などの生育に必要な最低照度は、およそ $500 \text{ lx}/12 \text{ h}$ とされるため、このアトリウム空間では緑化に適した植物種はないと結論づけられてしまう。それゆえ、特定の1日、または数日の光量計測では、光環境を十分に評価することはできない。つまり、アトリウム緑化計画時の光環境評価は、天候および季節変動を考慮した光量計測、またはシミュレーションによって行う必要がある。

図-10 日平均および12時間平均透過光量の季節変化(○:実測, * : 計算)

Fig. 10 Seasonal change of 24 and 12 h-averaged transmitting PPFD (○: observed, *: estimated).

3.6 光量子量と純光合成速度の関係

図-11にアトリウム植栽樹木、屋外に生育する樹木である、モッコク、カラタネオガタマ、室内に生育する観葉植物のスパティフィラム、パキラの光量子量と純光合成速度の関係を示す。カラタネオガタマとモッコクの $600 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の純光合成速度は、アトリウムよりも屋外に生育する葉で大きく、同一のアトリウム空間で得られた既存のデータ¹⁶⁾と同様の傾向であった。高光量域での全天光下に生育する葉の純光合成速度は、遮光条件下に生育するものよりも大きいとの従来の多くの報告^{3,10,33)}とも一致する。一方、室内の低光量条件下に生育する観葉植物の $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の光量下での光合成速度はおよそ $2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であり、アトリウムに生育する樹木よりも小さかった。Van Huylenbroeck et al. によって *in vitro* のスパティフィラムで得られた光量子量 $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 下での純光合成速度は $2.0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であり、本研究の測定値とほぼ同じ、暗呼吸速度は $0.5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ³⁴⁾と若干大きい程度であった。Kitajima¹⁰⁾によって太陽光の約2%の遮光下で得られたパキラ属(*Bombacopsis sessilis*, 以前パキラ属は *Bombacopsis* 属として扱われていた⁶⁾)の最大光合成速度は $5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であり、本実験で得られた値よりも大きい。本研究における生育光量が $6 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ とより小さいため矛盾しない。パキラ属の暗呼吸速度はおよそ $0.2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ¹⁰⁾と本実験とほぼ同値であった。

3.7 温度と呼吸速度の関係

図-12にアトリウム植栽樹木、屋外に生育する樹木、観葉

図-11 光量子量と純光合成速度の関係

Fig. 11 Relationships between PPFD and net photosynthetic rate of the investigated leaves.

植物の温度と暗呼吸速度の関係を示す。いずれの測定葉の暗呼吸速度も、従来の報告^{4,30)}のように温度とともに増加した。モッコクとカラネオガタマの25℃での暗呼吸速度は、アトリウムに生育するものより、屋外に生育するものの方が大きく、従来の傾向と一致する¹⁶⁾。また同一の生育環境に生育するカラネオガタマに比べて、モッコクの方が同一温度における暗呼吸速度は大きかった。一方、30℃における観葉植物2種の暗呼吸速度は、いずれも $0.2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 以下で、アトリウム空間に生育する樹木よりも小さかった。スパティフィラム、パキラの Q_{10} (20~30℃)は、2.23, 2.67であり、温室で生育する *Pachira insignis* の Q_{10} (25~35℃)=2.5³⁰⁾とほぼ同値であった。これらの測定葉の光合成、呼吸特性は従来の結果と矛盾せず、それぞれの生育場所および種の典型的な特徴を示していると考えられた。そこで、これらの結果を用いて以下の生育特性評価を行った。

3.8 植栽樹木の純光合成速度の季節変化

総光合成速度 (P_g) は光量のみ関数 (式 (9), 図-11), 暗呼吸速度 (R_d) は温度のみ関数 (式 (10), 図-12) と仮定して、推定した透過光量子量と室温の実測値から純光合成速度 (P_n) を算出した (式 (11))。

$$P_g = P_{\max} \cdot Q / (Q + P_{\max} / a) \quad (9)$$

$$R_d = b \cdot \exp(k \cdot T) \quad (10)$$

$$P_n = P_g - R_d \quad (11)$$

ここで $P_{\max}$ は飽和光合成速度, Q は光量子量, a, b, k は定数, T は温度である。なお、図-11 から算出した光-光合成曲線は切り枝を用い、携帯式光合成速度測定装置で設定した

環境条件下において得られた結果である。生育環境条件とは風速などが異なる。植栽樹木の着葉時の純光合成速度と異なると考えられるが、生育環境のままに純光合成速度を測定することは非常に困難であるため、測定値が生育環境における純光合成速度の指標となると考えて算出した。屋外では、しばしば土壌水分低下による水ストレスなどが生じるが、本研究では礫耕栽培で十分な灌水管理下にあるため、ストレスは全く生じていないものとした。また照明下での呼吸速度は、暗呼吸速度と異なるが、この相違も考慮していない。

2カ月ごとの22日が快晴と仮定し、モデルからシミュレートした透過光量子量と室温の実測値 (図-13(a)) をもとに算出したモッコクの純光合成速度の変化を図-13(b) に示す。なお、アトリウム内は空調制御されており、1994年8月26日から1995年6月30日までの最大日較差は3.4℃と小さく (日較差の平均値は1.3℃), 短期間では天候によらず温度変化が小さいため、計算対象日の22日の室温実測値をそ

図-12 温度と暗呼吸速度の関係

Fig. 12 Relationships between leaf temperature and dark respiration rate of the investigated leaves.

図-13 室温 (a), 算出したモッコクの純光合成速度の日変化 (b) および CO_2 収支の季節変化 (c)

Fig. 13 Seasonal variations of diurnal air temperature (a), estimated net photosynthetic rate (b) and daily CO_2 budget (c) of a leaf of *Ternstroemia gymnanthera*.

のまま用いた。室温が計算日によって異なるため夜間の純光合成速度に差はあるが、日中の変化は光量変化と同様の傾向を示す。この純光合成速度の積算値である日ごとの CO_2 収支を図-13(c) に示す。 CO_2 収支は、11月に最も小さく、3月に最も大きかった。日および12時間平均光量子量は、3月よりも4~8月の方が大きく(図-10)、光量と CO_2 収支のピーク時期が一致しないのは、4~8月の気温上昇で暗呼吸速度が増加するとともに、 $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 以上の光量域で光量増加に対する光合成増加量が小さいためと考えられる。 CO_2 収支は、成長量を示す指標と考えられるため、このモデルからアトリウム空間の樹木の成長量は、日や12時間平均などの光量子量だけではなく、温度の影響も考慮して評価をすべきと考えられる。

3.9 天井高が透過光量子量と純光合成速度に与える影響

天井と光量子計までの距離を1 m, 5 m, 10 m, 20 m, 30 mとした条件で透過光量子量の推定を行った。直達成分の透過に有効なトップライト部は、7番および5, 6番の植栽柵直上と前述と同一条件とした。天井までの距離が短くなるに従い、トップライト部の立体角が大きくなるため、散乱透過成分は大きくなる。それゆえ、光量子計設置場所からみた各天井高度におけるトップライト部の形態係数を算出し¹⁹⁾、形態係数に比例して透過光量子量を算出した。図-14に天井までの距離と形態係数の関係を示す。光量子計設置場所から天井までの距離が短くなるにつれ、形態係数は増加し、5 mで0.24の最大値をとるが、天井までの距離がさらに短くなると、形態係数は小さくなる。これは光量子計の設置場所が、トップライト部から外れているため、距離が短くなると、トップライト部外の天井部が占める立体角が大きくなるためである。光量子計がトップライト部直下に設置された場合には、図-14とは異なり、天井までの距離が短くなる程、形態係数が大きくなる。

図-15に天井までの距離を変化させた場合の12月、3月(9月)、6月22日の透過光量子量の日変化を示す。最も太陽高度の低い12月には、10 mまでは直達光成分の照射がみられるが、20 m以上の距離では直達光成分は照射されず最大値は $13 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ と小さかった。3月には、1 mの距離では直達光成分の照射はなかったが、それ以外の距離では直達光成分の照射があった。30 mの距離では、直達光成分の透過する時間は1時間程度だが、他の距離では3時間以上と長かった。最も形態係数の大きな5 mでは、直達光成分が照射する時間はおおよそ5時間と長く、最大値も $96 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ と計算した高度中で最も大きかった。6月にも1 mの距離では、直達光成分の照射はなかったが、他の距離では直達光成分の照射があった。しかし、その時間は2時間以内であり、3月よりも短かった。日中の最大値は1 m以外の距離でおよそ $160 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ と、3月に比べて50%以上増加した。しかし3月と異なり、日中の最大値を示す高度は10 mであり、透過光量は $168 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であった。

図-16に12月から6月までの各月22日の6時から18時までの12時間平均光量子量と天井までの距離の関係を示す。

図-14 天井までの距離と形態係数の関係

Fig. 14 Relationship between the distance from the ceiling and configuration factor.

図-15 天井までの距離を変化させた場合の透過光量子量の日変化

Fig. 15 Effect of the distance from the ceiling on the estimated diurnal change of transmitting PPFD.

図-16 天井までの距離と12時間平均透過光量子量の関係

Fig. 16 Effect of the distance from the ceiling on the estimated 12 h-averaged transmitting PPFD.

夏至や冬至を対称に、1月22日と11月22日の光量がほぼ同一であることを考慮すると、11月から1月の透過光量子量はいずれの距離でも $20 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 以下だが、2月、10月

には3~10 mの距離では、 $30 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 程度に、3月から9月には3~15 mの距離では $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 程度の12時間平均光量子量が得られる。また5 mと30 mの距離との12時間平均光量の差は、直達光成分の透過量が小さな11月から1月、4月から8月までは $15 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 以下と小さいが、2月、3月、9月、10月ではおよそ $20 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ と大きかった。このようにアトリウム空間の透過光量子量は、鉛直方向で大きく異なり、鉛直プロファイルは季節によって太陽高度が変化するため大きく変動することが明らかとなった。

3, 6, 9, 12月の22日が快晴と仮定し、天井までの距離を1, 5, 10, 20, 30 mと変化した条件でシミュレートした光量および実測の室温(図-13(a))から算出した純光合成速度の積算値である日ごとの CO_2 収支を図-17に示す。ここでは個葉あたりの CO_2 収支を算出しており、例えば屋外に生育するモッコクの葉が計算対象とした環境に存在した場合の収支を算出した。環境変化によって生じる順化による光合成パラメータの変化、季節変化などは考慮しなかった。 CO_2 収支は

図-17 天井までの距離を変化させた条件での CO_2 収支の変化

Fig. 17 Effect of the distance from the ceiling on the estimated daily CO_2 budgets.

いずれの生育環境および植物種についてもプラスだった。これは、個葉の光補償点が小さく、また夜間でも照明による $3.5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の光量子量があるためと考えられた。すべての生育環境、植物種での CO_2 収支の最大値は、屋外に生育するモッコクの3月22日における天井高までの距離が5 mでの $4.6 \text{ g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 、最小値は、同じく屋外に生育するモッコクの9月22日における天井までの距離が1 mでの $0.1 \text{ g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ であった。屋外に生育するモッコクの飽和光合成速度は大きいので、光量が大きければ CO_2 収支も大きくなるが、9月の高温季には暗呼吸速度が大きく、1 mの距離では光量が小さくなるため CO_2 収支が小さくなったと考えられる。

屋外に生育する樹木の9月22日における5 mと1 mの CO_2 収支の差は、光量と室温が影響したと考えられ $3 \text{ g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 以上と大きかった。一方、アトリウム植栽樹木ではおよそ $1.2 \text{ g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 、観葉植物ではおよそ $1.0 \text{ g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ と小さかった。屋外に生育する樹木2種の同一高度での CO_2 収支の季節変化量は $1.8 \text{ g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 以上と大きい、アトリウム植栽樹木2種とスパティフィラムの季節変化量は $1.1 \text{ g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 以下、パキラでは $0.7 \text{ g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 以下とさらに小さかった。また同一高度における12月22日の CO_2 収支は、屋外に生育するモッコクの5 m, 10 mの条件を除き、すべての高度でスパティフィラム、パキラの順で大きかった。

光量が大きな条件下では、屋外に生育する飽和光合成速度が大きな種の CO_2 収支は大きい、12月22日のように光量が小さな条件下では、観葉植物の CO_2 収支が相対的に大きくなり、低光量条件に適応していることがわかる。つまり観葉植物では、季節やアトリウムの構造(天井までの距離)による生育特性の変化は小さいが、通常屋外に生育する樹木の場合、順化により耐陰性を増したとしても、アトリウムの構造による透過光量の変化が生育に大きな影響を与えるため、アトリウムの構造を調査し植栽計画を立てることが重要と考えられる。

3.10 植栽場所が透過光量と純光合成速度に与える影響

現状の天井高で植栽場所を変化させた条件で、透過光量子量と葉の純光合成速度を考察する。対象としたアトリウム空間は、南西から北東に長辺をもつ空間であり、連絡橋などの存在やトップライト部がいくつかの小区画に分割して配置されているため、場所による透過光量子量に差がある。しかしこれらの影響を除くと、長辺方向では透過光量子量の大きな差はないと考えられる。そこで透過光量子量が大きく変化すると考えられる短辺方向において、現在光量子計の設置されているライン(図-18)中の5カ所を計算対象場所として、透過光量子量と純光合成速度の算出を行った。

図-19に12, 3, 6月の22日が快晴日であった場合の透過光量子量の日変化を示す。12月22日には、いずれの植栽場所でも直達透過光の照射はなく、各場所の形態係数の相違によって生じる散乱成分が異なるだけであった。3月22日には、植栽場所が最も北寄りの0 mでは、3時間以上の直達光成分の照射があるが、植栽位置が南に寄った16.8 mの場所では1時間程度と短くなる。6月22日では、逆に北寄りの

図-18 植栽場所による透過光量変化を評価するための計算対象地 (Y=0~16.8 は光量子設置場所からの距離 (m) を示す, 凡例は図-7 に同じ)

Fig. 18 Calculating points to evaluate the effect of the planting position in the atrium on transmitting PPFD. Symbols "Y=0" to "Y=16.8" indicate the distance (m) from the position of PPFD instrument. Legends are the same as Fig. 7.

図-19 植栽場所を変化させた条件での透過光量子量の日変化 (凡例は図-18 に同じ)

Fig. 19 Effect of the planting position in the atrium on the estimated diurnal change of transmitting PPFD. Legends are the same as Fig. 18.

0 m の植栽場所での照射時間は 1.5 時間程度であるが, 8.35 m の場所では 3.5 時間に増加した。このように植栽場所によって, 季節的に複雑に透過光量子量は変化した。

3 月 22 日と 9 月 22 日の透過光量子量が等しく, 快晴と仮定した条件で, 3, 6, 9, 12 月における 22 日の純光合成速度の日変化を図-20 に示す。3 月および 9 月には, パキラの一部を除いたすべての種で最も北よりの植栽場所での CO₂ 収支が大きかったが, 6 月および 12 月には, トップライト部の

図-20 植栽場所を変化させた条件での CO₂ 収支の日変化 (凡例は図-18 に同じ)

Fig. 20 Effect of the planting position in the atrium on the estimated daily CO₂ budgets. Legends are the same as Fig. 18.

中央である 8.35 m の植栽場所が大きかった。

スパティフィラムやパキラでは, いずれの計算日でも場所による CO₂ 収支の変動はおおよそ 30% 以下と小さいが, 6 月 22 日での屋外に生育するモッコクではおおよそ 90%, アトリウム植栽のモッコクではおおよそ 50% と大きかった。通常屋外に生育するモッコクでは, 場所による CO₂ 収支の変化が大きく, アトリウム空間の低光量条件に順化した樹木でも場所による変動がやや大きいため, 良好な生育状態を維持するためには, 植栽場所の十分な検討が必要と考えられる。一方, 観葉植物では, 最大光合成速度は小さいが暗呼吸速度も小さいため, アトリウムに生育する樹木と同程度以上の CO₂ 収支があり, 植栽場所による CO₂ 収支の変動が小さい。それゆえ, 植栽, 配置場所による生育特性の変化が小さいため, 低光量条件での植栽種として利用しやすいことが, このシ

ミュレーションによる生育評価からも説明できた。

4. おわりに

気象環境である光量や気温は1年のサイクルで変動する。それゆえ、植物の生育を考える場合には、1年を通じた積算値での評価が必要で、曇天や雨天時の透過光量、CO₂収支の算出を行わなければならない。また、アトリウム緑化計画段階では、透過光量を実測することは不可能であるため、透過に関する未知のパラメータの事前評価が必要である。そのためには、ガラスなどのトップライト部の特性、壁面の反射率などを含めたアトリウム構造と透過光量の関係などのデータの蓄積が必要である。しかし、未知のパラメータ算出が不可能であっても、アトリウム緑化計画時に、このモデルを用いて、トップライト部の高さや植栽場所が、植物の生育、CO₂収支に与える影響の相対的評価を行うことは可能である。つまり、このモデルによる評価でアトリウム緑化計画を進めることが可能である。ただし、本研究では、時間や季節変化を持たない個葉の光合成特性から定量的評価を行ったのであり、実際の葉では、時間や季節によって光合成特性が変化し、樹種による葉の展開、落葉期などが異なること、個体全体でのCO₂収支を考える場合には非同化部分の呼吸量の評価も必要となる。また、測定機器で得られた光合成速度とアトリウム空間の気流内での光合成速度との差も考慮する必要がある。

従来のように12時間の平均光量から植栽樹木を選定することは、光環境の変動を考えると不適切であることがわかったが、植栽された樹木個体の生育特性をこのモデルから評価するにはまだ情報が少なすぎる。アトリウム植栽樹木の生育特性の定量的評価を行うには、多くのアトリウムでの透過光量と、植栽樹木の光合成や呼吸特性に関するさらなるデータの蓄積が必要である。

本研究を行うにあたり、関西国際空港株式会社の関係者各位には多くの協力や調査に便宜を図っていただいた。また(株)都市・景観設計の奥村信一氏、住友林業緑化(株)の中川育男氏、田中豊氏にも調査に関し、多くの協力を頂いた。ガラスの特性に関しては、旭硝子(株)から資料を提供していただいた。これらの方々に心からの謝意を表する。

引用文献

- 1) 相賀一郎 (1992) 光バイオインダストリーのための光放射源, 照明学会編, 光バイオインダストリー, オーム社, p. 138.
- 2) 荒井良延・早川 真・戸河里敏 (1998) 大空間・アトリウムの熱環境計画手法の研究 (その2), 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, 545-548.
- 3) Bazzaz, F. B. and Carlson, R. W. (1982) Photosynthetic acclimation to variability in the light environment of early and late successional plants. *Oecologia*, 54 : 313-316.
- 4) Bolstad, P. V., Mitchell, K. and Vose, J. M. (1999) Foliar temperature-respiration response functions for broad-leaved tree species in the southern Appalachians. *Tree Physiology*, 19 : 871-878.
- 5) Conover, C. A., Poole, R. T. and Nell, T. A. (1982) Influence of intensity and duration of cool white fluorescent lighting and fertilizer on growth and quality of foliage plants. *J. Am. Soc. Hort. Sci.*, 107(5) : 817-822.
- 6) 土橋 豊 (1995) パキラ・アクアティカ, 植物の世界, 朝日新聞社, 7, p. 104.
- 7) Fails, B. S., Lewis, A. J. and Barden, J. A. (1982) Light acclimatization potential of *Ficus benjamina*. *J. Am. Soc. Hort. Sci.*, 107(5) : 762-766.
- 8) Fonteno, W. C. and McWilliams, E. L. (1978) Light compensation points and acclimatization of four tropical foliage plants. *J. Am. Soc. Hort. Sci.*, 103(1) : 52-56.
- 9) Johnson, C. R., Krantz, J. K., Joiner, J. N. and Conover, C. A. (1979) Light compensation point and leaf distribution of *Ficus benjamina* as affected by light intensity and nitrogen-potassium nutrition. *J. Am. Soc. Hort. Sci.*, 104(3) : 335-338.
- 10) Kitajima, K. (1994) Relative importance of photosynthesis traits and allocation patterns as correlates of seedling shade tolerance of 13 tropical trees. *Oecologia*, 98 : 419-428.
- 11) 近藤三雄 (1989) 室内の緑化, 亀山 章・三沢 彰・近藤三雄・奥水 肇編, 最先端の緑化技術, ソフトサイエンス社, pp. 35-56.
- 12) 近藤三雄・濱野周泰・金子忠一 (1990) アトリウムと緑化, ソフトサイエンス社, 129 pp.
- 13) Manaker, G. H. (1987) Interior plantscapes (2nd ed.). Prentice-Hall, Inc., 324 pp.
- 14) 村上周三・横井睦己・加藤信介・近本智行 (1997) アトリウム空間内の熱・空気流動性状に関する実験ならびにCFDによる解析, 空気調和・衛生工学会論文集, 19-28.
- 15) 中村彰宏・安倍宗文・奥村信一・中川育男・森本幸裕 (1998) 関西国際空港旅客ターミナルビルの室内空間に植栽された11種の常緑樹木の蒸散, 光合成特性とその影響要因, 日緑工誌, 24(2) : 71-79.
- 16) 中村彰宏・奥村信一・中川育男・森本幸裕 (1998) 異なる光環境に生育する室内緑化樹木の光合成特性, ランドスケープ研究, 61(5) : 511-514.
- 17) 中山哲士・石野久彌・郡 公子・植田義和・北村規明 (1997) 温室型アトリウムの環境実測解析 第4報, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 249-250.
- 18) 日本建築学会編 (1977) 日照の測定と検討, 彰国社, p. 20.
- 19) 日本建築学会編 (1994) アトリウムの環境設計, 彰国社, 149 pp.
- 20) 西 良祐・泉川正英 (1985) 人工環境での樹木の成長異常について, 甲子園短期大学紀要, 5 : 35-41.
- 21) 西 良祐・永野明範・泉川正英 (1994) 人工地盤の気象と植物の生育, 甲子園短期大学紀要, 13 : 25-29.
- 22) 奥村信一 (1994) キャニオン (関西国際空港旅客ターミナル, Process: Architecture), プロセスアーキテクチャー, 122 : 174-177.
- 23) 大山能永・西村正和・乾 正雄 (1998) アトリウムの昼光環境に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, 503 : 69-76.
- 24) 清野 豁 (1987) 太陽エネルギーの気候学的計算法, 柴田和雄・内嶋善兵衛編, 太陽エネルギーの分布と測定, 学会

- 出版センター, pp. 135-137.
- 25) 宿谷昌則 (1993) 数値計算で学ぶ光と熱の建築環境学, 丸善, 302 pp.
- 26) 隅 和弘・高橋紀行・樋口祥明 (1996) 植物を取り込んだ大型アトリウムの温熱環境の評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 865-866.
- 27) 鈴木知古・樋口春三 (1990) *Ficus* 属 3 種の弱光ストレスに対する生理学的, 形態学的反応, 園学雑, 59 別 2 : 556-557.
- 28) 鈴木知古・樋口春三 (1991) *Ficus benjamina* の弱光ストレスによる葉の内部構造と光合成速度の馴化反応, 園学雑, 60 別 2 : 552-553.
- 29) 彰国社編 (1993) 建築大辞典, 彰国社, p.39.
- 30) Todaria, N. P. (1986) Respiration rates of some greenhouse cultivated tropical and subtropical species, *Biologia plantarum*, 28 (4), 280-287.
- 31) 戸河里敏・早川 真・荒井良延 (1988) 大きなトップライトを有するアトリウムの熱環境実測, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 467-468.
- 32) (財)都市緑化技術開発機構 (1996) 特殊空間緑化シリーズ ③ 植物マニュアル, 誠文堂新光社, 190 pp.
- 33) Thurnbull, M. H. (1991) The effect of light quantity and quality during development on the photosynthetic characteristics of six Australian tree species. *Oecologia*, 87 : 110-117.
- 34) Van Huylenbroeck, J. M. and Debergh, P. C. (1996) Impact of sugar concentration *in vitro* on photosynthesis and carbon metabolism during *ex vitro* acclimatization of *Spathiphyllum* plantlets, *Physiologia plantarum*, 96 : 298-304.

(2001.9.29 受理)