異なる光環境に生育する室内緑化樹木の光合成特性

Photosynthetic Characteristics of Interior Trees under Different Light Environment

中村彰宏* 奥村信一** 中川育男*** 森本幸裕*

Akihiro NAKAMURA Shinichi OKUMURA Ikuo NAKAGAWA Yukihiro MORIMOTO

摘要：異なる光環境（全日光下、遮光下、室内）に生育するモッコク、クロガネモチ、モチノキ、カラタネオガタマの常緑広葉樹4種の光合成特性を、切り枝を用いてアトリウム空間で測定した。これら4種の樹木は、暗呼吸速度、光補償点が、同時に測定を行った陽樹のアカメガシワに比べて小さく、異なる光合成特性を示した。およそ70%の遮光条件下では、野外の全天条件下に比べ多少耐陰性が増加し、室内条件下ではさらに耐陰性が増加した。屋外または遮光条件下のモチノキ、クロガネモチは、高光量域でアカメガシワと同程度の大きな光合成速度を示すが、室内条件下では、熱帯林林床の樹木に近い小さな暗呼吸速度、光補償点を示し、光合成の可塑性が大きな樹種と考えられた。

1. はじめに

近年アトリウム空間を含めた室内での緑化事例が増加している。しかし室内空間での緑化に関する研究は、海外で *Ficus benjamina* をはじめとした熱帯地方原産の観葉植物を対象とした研究³⁾⁴⁾⁶⁾などは盛んに行われているものの、わが国における研究事例は多くなく、また日本原産の樹木を対象とした研究事例¹⁰⁾が十分あるとは言えない。アトリウムなどの室内空間に植物を植栽する場合には、急激な環境条件の変化から生じるストレスによる成長量の低下、枯死等を防止するために順化处理が必要とされる¹¹⁾¹⁵⁾。低光量条件下のアトリウム空間への導入時には、様々な環境変化の中でも、光環境の変化が大きいので、光順化を十分に行う必要がある。

従来、異なる光環境下および光環境変化が与える植物の光合成特性に関する研究は、森林遷移解明の目的での熱帯林を構成する種特性⁸⁾¹⁸⁾、陽性および陰性植物の特性²⁾、果樹における異なる遮光率が生育、生理特性に与える影響¹²⁾、また観葉植物の室内緑化を想定しての順化特性⁶⁾などがある。わが国においても、日本に自生する樹種を対象として、森林の遷移機構解明を目的とした樹種特性⁵⁾、林業における施業に伴う光環境変化が生理特性に与える影響評価¹³⁾²¹⁾、光環境の異なる樹冠部位や異なる葉齢での光合成特性の相違に関する研究⁷⁾などはあるものの、室内緑化を目的とした光順化や光環境変化が光合成特性に与える影響に関する

研究はない。

そこで低照度条件下で生育が可能な、わが国原産の植栽樹木など4種の常緑広葉樹を対象に、光順化に伴う光合成特性変化の解明を目的として、光環境の異なる屋外、遮光、室内の3条件下に生育する個葉の光合成速度の測定を行い、光合成特性から光順化および耐陰性について考察を行った。

2. 調査地および調査方法

(1) 実験場所とその光環境調査

光環境の異なる屋外、遮光、室内に生育する3条件下の植栽樹木の切り枝を用いて光合成速度の測定を行った。屋外条件下としては、大阪府堺市に位置する大阪府立大学構内の全日光下に生育する樹木を、遮光条件下としては、大阪府泉佐野市に設置された順化施設内に生育する樹木を、室内条件下としては、大阪府泉佐野市および泉南市に位置する関西国際空港のアトリウム空間に生育する樹木を測定に用いた。

順化施設は、鉄パイプで組まれた高さ8.5m、長さ18.5m、幅13mの大きさである。骨組み周辺部には遮光率がおおよそ70%のネットがかけられており、この中に順化中の樹木が設置されてい

写真-1 遮光条件下の順化施設

写真-2 関西国際空港のアトリウム

る(写真1)。

関西国際空港のアトリウムは(写真2)、1994年に開港した旅客ターミナルビル内のキャニオンと呼ばれる空間である。このアトリウム空間は、高さおよそ27m、長さ275m、奥行き27mの大きさである。天井部にはトップライトが設けられ、太陽光が入射している。このキャニオンの1階部分に、およそ4m四方の大きさの植栽枡が34個設けられ、各植栽枡に樹高4-7mの、主として日本原産の常緑広葉樹が2-3本植えられている。

(2) 植物材料

光合成速度の測定に用いた樹木は、日本原産の耐陰性を有すると考えられている¹⁶⁾ モッコク (*Ternstroemia gymnanthera*)、クロガネモチ (*Ilex rotunda*)、モチノキ (*Ilex integra*) および中国原産のカラタネオガタマ (*Michelia figo*) の4種である。またこれらの耐陰性を有する¹⁶⁾と考えられる常緑広葉樹との比較のために、大阪府立大学構内に生育する、陽樹¹⁷⁾¹⁹⁾のアカメガシワ (*Mallotus japonicus*) の光合成速度測定も同時に行った。

測定に用いた各条件下に生育する樹木の樹高は、いずれも3-6mであった。遮光条件下の樹木は、1997年4月下旬に、根系部が完全に根洗いされた後、多孔質焼成培土をもつステンレス製のコンテナにて隣耕栽培がなされている。灌水は、ドリップチューブによる自動灌水および施設上部より葉面への定期的なミスト灌水が行われている。

室内条件下の樹木は、1994年6、7月におよそ6ヶ月間、上記の70%遮光条件での順化を経て移植された。屋外条件下の測定には、1997年に展開した当年葉を用い、遮光条件下では、順化施設に移植された後に展開した葉を用いた。室内条件下では、1997年または前年の1996年に展開した比較的光量を受ける樹冠外部に位置する葉を用いた。ただし大学構内および周辺に、屋外の全天下に生育する樹高3-6mの適当なモチノキが存在しなかったため、この条件下のモチノキの測定は行わなかった。ただし参考として、遮光条件下に生育する樹葉の中で、順化施設に移植する前年である1996年に展開した葉の光合成速度測定をあわせて行った。

異なる光環境に生育する樹木の低光量域での光合成特性の比較を行うため、生育地での測定ではなく、温湿度環境がほぼ一定な、アトリウム環境下で、切り枝を用いて、光合成速度の測定を行った¹³⁾²¹⁾。測定に用いた葉は、前日または当日朝に、枝の水切り処理を行い、三角フラスコ内に設置し、光合成速度を測定した。

(3) 光環境と光合成速度の測定方法

光合成速度の測定は、空調のなされている関西国際空港のアトリウム空間の1階部で、1997年7月から9月にかけて携帯式光合成・蒸散速度測定装置(LI-COR社; LI-6200)で行った。測定はトップライトおよび側面のガラスからの入射光のもとで、8時から20時まで、およそ1時間毎に測定を行った。なお光量がゼロである時の暗呼吸速度は、測定葉を1時間程度暗黒条件下に設置したのちに、チャンバーを黒色の布およびポリエチレン袋で覆い測定した。

また各生育地の光環境を明らかにするために、量子計(英弘精機; ML-020P)による光合成有効量子束密度(以下光量子量とする)の連続測定を行った。

なお光-光合成曲線は次式の非直角双曲線を用いて回帰を行った。²⁰⁾

$$mPg^2 - (aQ + Pg_{max})Pg + aPg_{max}Q = 0 \quad (1)$$

$$P_n = Pg - R_d \quad (2)$$

ここでPgは総光合成速度、P_nは純光合成速度、R_dは暗呼吸速度、Pg_{max}は飽和光合成速度、Qは光量子量、mは曲線の曲率、aは初期勾配である。

3. 結果および考察

(1) 各条件の光環境

まず快晴日の1997年8月28日および曇天日の9月25日の各生育地の光量子量および透過率の日変化を図1に示した。快晴日は屋外の光量子量が日中2000 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 程度に上昇するが、曇天日は1000 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 程度であった。一方、遮光条件下の光量子量は、快晴日は日中の最大値が550 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 程度で、透過率は20-30%程度であった。直達日射が施設内の構造物の陰となることがあり、時折光量子量および透過率が大きく減少することがあった。一方、曇天日の光量子量の最大値は200 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 程度、透過率は10-20%と晴天日に比べ小さかった。この曇天日の透過率の低下は、散乱日射量が日射量に占める割合が大きくなったため生じたと考えられる。アトリウム空間の晴天日の光量子量は、従来の報告のように¹⁴⁾、正午付近の数時間のみ相対的に大きな220 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 程度の光量子量、12%の透過率であったが、10時以前および14時以降はおおむね2%程度の極めて小さな透過率であった。曇天日は、直達日射による透過光が極めて小さいため、日中を通じて4%と小さな透過率であった。

(2) 光量子量と光合成速度の関係

図2に8月12日のカラタネオガタマの光量子量と光合成速度の関係を示した。この測定日のアトリウム空間内の気温および葉温は28℃程度、湿度は60%程度、二酸化炭素濃度は、旅客ターミナルという人の多い閉鎖空間であるため590ppm程度と屋外での通常値に比べ200ppm程度高い状態であった。従来より、二酸化炭素濃度上昇による光合成速度の増加が報告されており⁹⁾、図2に示された光合成速度は、通常屋外の同一光量条件下で観測される光合成速度に比べ多少大きな値である可能性がある。い

図-1 屋外、遮光、室内条件下での晴天日および曇天日の光量子量と透過率の変化

図-2 カラタネオガタマの光量子量と光合成速度の関係

れの3条件下の測定値とともに、光量子量の増加に伴い、光合成速度が増加しており、光量子量と光合成速度の高い相関が見られ、光合成速度が光量子量に大きく規定されていることがわかる。光合成速度の測定は、トップライト部および側面のガラス部からの透過光を利用して行ったため、図1に示されるように、高光量域でのデータが少ない。それゆえ1, 2式による光-光合成曲線の回帰では、飽和光合成速度や高光量域での光合成速度の推定値の信頼性に欠ける。しかし、本研究では低光量条件下である室内空間での生育特性の評価を目的に行っているため、低光量域のデータのみを注目し、これらのデータを用いて解析を進めた。1, 2式の回帰による結果は図2中の回帰曲線からもわかるように、いずれの測定日の相関係数がほぼ0.9を越え、1, 2式による光-光合成速度の関係が良好に回帰できた。

図3に、異なる光環境である屋外、遮光、室内の3条件下に生育させた常緑広葉樹4種の光-光合成曲線を示した。低光量条件下での光合成特性を考察するため、 $100 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ までの光量子量域の特性を示した。いずれの樹木も、室内条件下の暗呼吸速度が他の条件下での値よりも小さい。光補償点に関しても、全ての樹木で室内条件下の値が最も小さかった。またアトリウム空間では相対的に大きな $100 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ の光量時の光合成速度は、屋外条件下に比べ室内、遮光条件下では小さな値であった。しかしクロガネモチは、室内環境下でも植栽樹木の中で相対的に大きな光合成速度が測定されており¹⁹⁾、光量子量が $100 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ では、3条件下の中で最も大きな光合成速度であった。

(3) アカメガシワとモチノキ、クロガネモチの光合成特性

陽樹のアカメガシワと、屋外条件下に生育するクロガネモチ、そして前年に葉を展開させ、その後遮光条件に移植されたモチノ

キ旧葉の光量子量と光合成速度の関係を図4に示した。すでに筆者らはモチノキ、クロガネモチは、室内環境下における11種の室内緑化樹木の中で、 $500 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ と室内環境としては大きな光量時に、相対的に大きな光合成速度を示したとの報告している¹⁹⁾。屋外に生育するモチノキ、クロガネモチも、水分ストレスの生じていないと考えられる切り枝では、 $500 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ の光量子量の時に、およそ $15 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ の大きな光合成速度であった。同様の傾向はアカメガシワでも見られ、耐陰性を有すると考えられるモチノキ、クロガネモチと、陽樹のアカメガシワの高光量域における光合成特性に、ほとんど差は見られなかった。従来陰性および陽性植物の飽和光合成速度は、大きく異なると言われており²¹⁾、この結果を適用するとモチノキ、クロガネモチもアカメガシワと同様に陽樹と考えられる。ただし、9月30日に測定したアカメガシワは、 $100 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 程度の低光量子量条件下で $9 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ もの光合成速度を示し、比較的光合成速度の大きなモチノキ、クロガネモチの2倍程度の値であった。この傾向は、同時に測定された気孔コンダクタンスが、モチノキ、クロガネモチにおける $100 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ の光量子量の時に、 $0.1 \sim 0.2 \text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ であるのに対し、アカメガシワは3倍程度の約 $0.6 \text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ を示していたことから裏付けられる。陽樹であるアカメガシワは、水分条件が良好であれば、低光量条件下でも、極めて大きな光合成速度を示し、高光量域で大きな光合成速度を示すモチノキやクロガネモチとは特性の異なることが明らかとなった。

(4) 暗呼吸速度および光補償点の相違

図5に7月から9月までの各測定日に得られた式1, 2の回帰式から算出した暗呼吸速度および光補償点の平均値を示した。なおアカメガシワは2個体のデータを示した。暗呼吸速度は、陽樹のアカメガシワでは $2.5 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 以上と、すべての樹木の中で最高値を示した。また光補償点も、屋外条件下の樹木と大きな相違はないが、 $30 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 程度と最も大きな値を示し、典型的な陽性植物の特徴を示した。

一方、常緑広葉樹4種は、暗呼吸速度がすべての樹木で $1.6 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 以下、光補償点が26以下 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ と、陽樹と異なる特性を示した。モチノキ以外のモッコク、カラタネオガタマ、クロガネモチの暗呼吸速度は、屋外および遮光条件下で $1.1 \sim 1.5 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ であり、両者に大きな変化が見られなかったが、モッコク、クロガネモチでは遮光による低下がわずかに見られた。一方、光補償点は、屋外条件下で $24 \sim 26 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ であるのに対し、遮光条件下では $15 \sim 23 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ と低下した。24%, 47%での遮光条件下のスターフROOTSの暗呼吸速度、光補償点は、全天光条件下に比べ遮光率の増加とともに低下したとの結果がある¹²⁾。本研究での、遮光処理による暗呼吸速度の大

図-3 低光量域での光-光合成曲線

図-4 屋外および遮光条件下に生育する樹木の光-光合成曲線

図-5 各樹種、各条件下の暗呼吸速度(上段)と光補償点(下段)

*モチノキの屋外条件下は測定せず

きな低下は見られなかったが、光補償点が低下し、遮光処理によって耐陰性が多少増加したと考えられる結果は、既存の報告と矛盾するものではない。

また、室内条件下では、暗呼吸速度は $0.4\sim 0.7\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、光補償点は $6\sim 12\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ と、屋外、遮光条件下に比べて小さな値であり、耐陰性が大きく増加したと考えられる。暗呼吸速度および光補償点は、ハワイの森林下層に生育する樹木で $0.12\sim 0.26\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ および $1.7\sim 6.3\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ¹⁸⁾、耐陰性を有する熱帯の樹木の実生でおよそ $0.1\sim 0.5\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ および $2\sim 12\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ⁸⁾との報告がある。これらの結果と比較し、本研究で得られた4種の常緑広葉樹は、光補償点からは熱帯林下層に生育する耐陰性を有する樹木の個葉と同程度の特性を、暗呼吸速度からは、熱帯産の樹木よりも多少耐陰性の劣る特性であると考えられる。

このように屋外条件下に比べて遮光条件下では耐陰性が若干増加し、低光量アトリウム空間内での3年間の生育により、さらに耐陰性が増加し、低光量条件下へ適応したと考えられた。

遮光または屋外条件下に生育するモチノキ、クロガネモチは、高光量域において、陽樹であるアカメガシワと同程度の大きな光合成特性を示す一方、室内条件下では、屋外条件下と比べて、光補償点、暗呼吸速度の減少の変化が考えられ、生育環境に応じて、光合成特性の可塑性が大きな樹種であることが明らかとなった。

謝辞

なお、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大なご協力をいただいた。また京都大学大学院森林水文学研究室の小杉緑子助手には有益な助言をいただいた。ここに心より謝意を表します。

引用文献

- 1) Bazzaz, F. B. and R. W. Carlson (1982) : Photosynthetic acclimation to variability in the light environment of early and late successional plants : *Oecologia* 54, 313-316
- 2) Bohning, R. H. and C. A. Burnside (1956) : The effect of light intensity on rate of apparent photosynthesis in leaves of sun and shade plants : *Am. J. Bot.* 43, 557-561
- 3) Collins, P. C. and T. M. Blessington (1983) : Postharvest effects of shipping temperatures and subsequent interior keeping quality of *Ficus benjamina* : *HortScience* 18(5), 757-758
- 4) Conover, C. A. and R. T. Poole (1975) : Acclimatization of tropical trees for interior use : *HortScience* 10(6), 600-601
- 5) 遠藤明男・及川武久 (1985) : 生育光環境を異にするシラカシ幼樹の冬季の光合成・蒸散特性 : *日生態会誌* 35, 121-131
- 6) Fonteno, W. C. and E. L. McWilliams (1978) : Light Compensation Points and Acclimatization of Four Tropical Foliage Plants : *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 103(1), 52-56
- 7) Hashimoto, Ryoji and T. Suzaki (1979) : Studies on the response of photosynthesis to light intensity in leaves attached at various positions in trees crowns of a *Cryptomeria japonica* even-aged stands - Effects of shading and leaf aging : *J. Jap. For. Soc.* 61(6), 193-201
- 8) Kitajima, Kaoru (1994) : Relative importance of photosynthesis traits and allocation patterns as correlates of seedling shade tolerance of 13 tropical trees : *Oecologia* 98, 419-428
- 9) 清田信・西村正英・松下敦彦・大東秀章・相賀一郎 (1994) : 二酸化炭素濃度上昇が *Acacia mangium* 幼樹のガス交換および生長におよぼす影響 : 第7回環境情報科学論文集, 19-23
- 10) 栗田端江・河村止・近藤三雄 (1995) : 室内の低照度条件下における造園植物の生育可能性について : *造園雑誌* 59(1), 12-23
- 11) Manaker, G. H. (1987) : *Interior Landscapes* (2nd edn.) : Prentice-Hall, Inc, pp.324
- 12) Marler, T. M., B. Schaffer and J. H. Crane (1994) : Developmental light level affects growth, morphology and leaf physiology of young *Carambola* trees : *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 119(4), 711-718
- 13) 松本陽介・根岸賢一郎 (1982) : 林内および伐採跡地に生育するシラベ前生稚樹の光合成・呼吸 : *日林誌* 64(5), 165-176
- 14) 中村彰宏・梶川剛史・奥村信一・中川育男・森本幸裕 (1996) : アトリウム環境での植栽樹木の光合成特性 : 第28回日本緑化工学会研究発表会要旨集, 118-119
- 15) 日本建築学会編 (1994) : アトリウムの環境設計 : 彰国社, 149pp
- 16) 日本造園学会編 (1978) : 造園ハンドブック : 技報堂出版, 1350pp
- 17) 沼田貞 (1977) : 群落の遷移とその機構 植物生態学講座4 : 朝倉書店, 306pp
- 18) Pearcy, R. W. and H. W. Calkin (1983) : Carbon dioxide exchange of C3 and C4 tree species in the understory of a Hawaiian forest : *Oecologia* 58, 26-32
- 19) 島田和則 (1994) : 高尾山における先駆性高木種5種の地形分布と樹形の意義 : *日生態会誌* 44, 293-304
- 20) 島田緑子 (1992) : 光合成・蒸散過程の統合的理解について(Ⅰ) : *日本緑化工学会誌* 17(4), 224-235
- 21) 丹下健・鈴木誠・糟谷重夫・糟谷伊左義 (1991) : 被陰条件下で育てたスギ、ヒノキ苗木の被陰解除前後の光合成特性と成長 : *日林誌* 73(4), 288-292

Summary : Photosynthetic characteristics of 4 broad leaved woody species (*Ternstroemia gymnanthera*, *Ilex rotunda*, *Ilex integra* and *Michelia figo*) under different light environments (full sun, shaded and interior condition) were measured in an atrium building for detached leaves. These 4 species had lower dark respiration and light compensation points than that of *Mallotus japonicus* which is a sun tree and differs from *M. japonicus* in photosynthetic characteristics. Shade tolerances of 4 species increased under 70% shaded condition, those under interior condition increased furthermore. *I. rotunda* and *I. integra* under full sun or shaded condition had high photosynthetic rate like *M. japonicus* at relative high light level. On the other hand, these two species had lower dark respiration and light compensation points which are almost at the same rate of trees in understory of tropical rain forest. So these two species seem to have high photosynthetic plasticity.