

論文内容の要旨

論文題目 室内緑化が温湿度環境と空調負荷へ及ぼす影響に関する研究
—現場実測及び室内植栽の蒸散作用の計算モデルについて—

氏名 都 周 熙

都市への急激な人口・業務の集中は、都市の緑の減少をもたらし、それに伴ってヒートアイランド現象などのさまざまな都市公害が発生し、都市環境・生活空間を悪化させてきた。高密度・高地価の都市において緑を新たに増やす試みとして、建築物の屋上やビル・家屋の壁面などの建物外皮緑化と合わせ、アトリウム空間・地下空間・建物内のような室内において緑化を行うケースが増えてきている。そしてこうした建物緑化の傾向は、マイクロ気象の緩和効果・豊かさ安らぎ感の向上などの身近な環境の改善効果、構造物に対する温度変化の影響軽減などの省エネルギー効果、低負荷・循環・共生型への都市環境の改善効果もあることから、今後一層広まるものと思われる。

ヒートアイランド問題に対する建築物の屋上や壁面の緑化の効果に関する研究は、近年多く行われている一方、室内緑化に関する研究はまだ数少ないのが現状である。しかし、室内での植栽の蒸散は室内温湿度環境と空調の潜熱負荷へ影響を及ぼすため、植栽の蒸散作用の定量的把握と負荷の検討を行うことが重要である。

そこで本研究においては、室内植栽の蒸散作用の計算モデルを構築し、そのモデルを組み込んで空調負荷の計算を行うことを目的とする。

植栽の蒸散作用に関する研究では、蒸散速度を葉の気孔率で推定する方法と、温度・湿度などの環境因子をそのまま使って推定する方法に大きく二つに分かれている。

気孔率で推定する方法については、野島らのスーパーポロメータによる実測から示した飽差 \times (光合成有効放射)^{1/2}といった気孔コンダクタンスモデル、小杉らの気孔率を光合成有効放射、飽差、葉温、それぞれの関数で表す JARVIS モデル、また、平岡のニューラルネットワークを用いた気孔コンダクタンスモデル化などがあるが、これらのモデルで使われているデータは農学や気象学で取られているもので、農学や気象学で扱わない室内植栽については、データ不足と計測機器を使用しにくいなど難点がある。

同じく植栽モデルの既存研究でも、都市気候への適用を目的とした SIB モデルや SPAC モデルなど農学や気象学で開発されたものが用いられていて、これらは本来、森林や農場などを想定した鉛直 1 次元モデルであり、室内緑化に使用されている小規模な植栽に適用するのは困難である。

室内植栽を対象とし、環境因子をそのまま用いて蒸散量を推定している既存研究はいくつかあり、松井らは、室温、風速、日射量(60W と 800W)を環境因子とした実験を行っているが、蒸散速度と風速、日射量との関係が必ずしも明確ではない結果となっている。石野・長嶺・浅海・仁科らの実験では、蒸散量に影響を与える環境因子を明らかにし、環境因子を説明変数とする蒸散量に対する回帰式を作成している。しかし、この実験で対象とした植栽は高さ 70cm くらいの小さな観葉植物で、環境因子の一つである照度値がある一定場所のものにしているため、実験室の環境と少しでも違う環境、観葉植物の配置、大きさの差がある場合については検討されていない。

よって本論文では、まず環境因子を変化させながら植栽の実験を行い、各条件下での蒸散量を計測した。ついで蒸散に最も影響を与える照度に注目し、植栽の樹冠内照度分布まで考慮した照度計算法を構築することで植栽の蒸散作用に関するモデル化を行い、植栽の大きさや葉面積密度の変化に対応して植栽の蒸散量を計算できるようにした。最後に、照度計算に基づく蒸散モデルと熱負荷計算を併用することで、植栽の蒸散が空調負荷に与える影響について、あるアトリウムを対象に、シミュレーションによるケーススタディーを行った。

本論文は、全 7 章で構成される。

第 1 章「序論」では、本研究の背景と目的を述べている。

第 2 章「緑化アトリウムの実態調査」では、室内緑化の実態把握のために、建築雑誌において 1993 年～1997 年に紹介された 210 個のアトリウムを持っている建物の中で、東京を中心とした緑化されたものを、

計 25 件抽出し、実地調査ならびに文献調査を行った。そして、さらに室内空間における緑化手法についても述べている。アトリウム形態、緑化された面積、植物の種類・大きさ・数・設置方法などを調査の項目とした結果、アトリウム形態は中庭型が多く見られ、用いられる樹木の種類はベンジャミンやヤシ類が一般的であることがわかった。

第 3 章「緑化アトリウムの現場実測」では、アトリウム内部に設置された植栽が室内温湿度環境や空調負荷に与える影響を定量的に評価することを目的として、東京にある緑化されたアトリウムを有する某ビルにおいて、2000 年の夏季に実測を行った結果を報告している。

アトリウム内に発生する全体の潜熱の計測や、樹木を取り除いた場合との比較などは現実的に困難なので、同一建物における緑化されているアトリウムと緑化されていないアトリウムについて、シャッターの開閉と池の水の有無に関する組み合わせで三つの実測モード下で、アトリウム内の垂直温度湿度分布と、アトリウム内の負荷を処理している代表的な空調機について実測を行い、実態を把握した。その結果、緑化されたアトリウムにおいては、緑化されていないアトリウムと比べて、床付近での温度は低い一方で湿度は高くなる傾向が見られ、また池の水がある時には空調負荷の潜熱の割合が増加することを確認した。

第 4 章「植栽の蒸散作用に関する室内実験」では、室内緑化を行った際に室内の環境に大きな影響を与えるのは植栽の蒸散作用であり、その蒸散作用は空調の潜熱負荷に影響を与えるためことから、その性状を把握することを目的に行った実験について述べている。まず蒸散量に有意な影響を与える環境因子を確認し、蒸散量のモデル化を検討するために、温度・湿度・照度の三つを主因子とする実験計画法に基づく直交実験を人工環境室で行い、植栽の蒸散量の変化を計測した。その結果を元に、蒸散量を被説明変数、温度・湿度・照度を説明変数とする重回帰分析を行った結果、ベンジャミン大・小ともにいずれもよい相関を見せており、相関係数も 0.94~0.95 と良好であった。しかし、蒸散量に最も大きな影響を与えるのは照度であるが、ベンジャミン大とベンジャミン小で照度の係数を比較すると 0.00109 と 0.00068 で、同一種類の植栽であるにもかかわらず、大きく異なっていた。これは、説明変数の照度が樹冠の上部で計測したものをを用いているために、実際にそれぞれの葉にあたる照度はこれと異なっていること、ベンジャミン大が小に比べてその大きさの割に葉の数が少なく、その分だけ葉に光があたりやすいためと思われた。そこで、葉面積密度を考慮した樹冠内照度計算の必要性が明らかになった。

第 5 章「樹冠部及び室内照度分布の計算」では、4 章で必要性が明らかになった室内植栽の照度分布のより正確な分析のため、従来の形態係数を用いる方法では評価が困難な、複雑な形状の物体同士の間でも柔軟な対応が可能であるモンテカルロ理論に基づいた照度分布の計算方法を示した。植栽の樹冠部をモデル化し、樹冠の葉面積密度が決められたら、そのモデル化に従い樹冠空間内に葉がランダムに配置されるようにした。構築された照度計算方法の精度を検証するため、第 4 章で行った人工環境実験室内照度分布実験における実測値と計算値を比較した結果、5%~8%の誤差範囲に収まり、よく再現できていることが確認された。ついで、第 4 章での実験データをもとに各照度水準における実験対象植栽の樹冠部照度分布の計算を行い、その計算結果を用いて重回帰分析を行った結果、ベンジャミン大・小の樹冠内葉面積密度に影響されない回帰式が算出でき、蒸散量に関する重回帰式の精度を高めることが出来た。

第 6 章「植栽の蒸散を組み込んだ空調負荷計算」では、5 章で構築した照度計算法と植栽の蒸散作用に関するモデルを用いて、あるアトリウムを対象に、植栽の蒸散が空調負荷に与える影響を、照度と熱負荷計算を併用することで、シミュレーションによるケーススタディーを行った。熱負荷計算プログラムは GAEA を使用した。植栽がない場合とある場合のアトリウムの顕熱・潜熱空調負荷に関するシミュレーション結果の比較を行った。そして、同じ葉面積の場合は、樹冠部面積が大きくなり、葉面積密度が低くなると蒸散が増え、空調負荷に与える影響も大きくなることを把握した。

論文内容の要旨

論文題目 室内緑化が温湿度環境と空調負荷へ及ぼす影響に関する研究
—現場実測及び室内植栽の蒸散作用の計算モデルについて—

氏 名 都 周 熙

都市への急激な人口・業務の集中は、都市の緑の減少をもたらし、それに伴ってヒートアイランド現象などのさまざまな都市公害が発生し、都市環境・生活空間を悪化させてきた。高密度・高地価の都市において緑を新たに増やす試みとして、建築物の屋上やビル・家屋の壁面などの建物外皮緑化と合わせ、アトリウム空間・地下空間・建物内のような室内において緑化を行うケースが増えてきている。そしてこうした建物緑化の傾向は、マイクロ気象の緩和効果・豊かさ安らぎ感の向上などの身近な環境の改善効果、構造物に対する温度変化の影響軽減などの省エネルギー効果、低負荷・循環・共生型への都市環境の改善効果もあることから、今後一層広まるものと思われる。

ヒートアイランド問題に対する建築物の屋上や壁面の緑化の効果に関する研究は、近年多く行われている一方、室内緑化に関する研究はまだ数少ないのが現状である。しかし、室内での植栽の蒸散は室内温湿度環境と空調の潜熱負荷へ影響を及ぼすため、植栽の蒸散作用の定量的把握と負荷の検討を行うことが重要である。

そこで本研究においては、室内植栽の蒸散作用の計算モデルを構築し、そのモデルを組み込んで空調負荷の計算を行うことを目的とする。

植栽の蒸散作用に関する研究では、蒸散速度を葉の気孔率で推定する方法と、温度・湿度など

の環境因子をそのまま使って推定する方法に大きく二つに分かれている。

気孔率で推定する方法については、野島らのスーパーポロメータによる実測から示した飽差×(光合成有効放射)^{1/2}といった気孔コンダクタンスモデル、小杉らの気孔率を光合成有効放射、飽差、葉温、それぞれの関数で表す JARVIS モデル、また、平岡のニューラルネットワークを用いた気孔コンダクタンスモデル化などがあるが、これらのモデルで使われているデータは農学や気象学で取られているもので、農学や気象学で扱わない室内植栽については、データ不足と計測機器を使用しにくいなど難点がある。

同じく植栽モデルの既存研究でも、都市気候への適用を目的とした SIB モデルや SPAC モデルなど農学や気象学で開発されたものが用いられていて、これらは本来、森林や農場などを想定した鉛直 1 次元モデルであり、室内緑化に使用されている小規模な植栽に適用するのは困難である。

室内植栽を対象とし、環境因子をそのまま用いて蒸散量を推定している既存研究はいくつかあり、松井らは、室温、風速、日射量(60W と 800W)を環境因子とした実験を行っているが、蒸散速度と風速、日射量との関係が必ずしも明確ではない結果となっている。石野・長嶺・浅海・仁科らの実験では、蒸散量に影響を与える環境因子を明らかにし、環境因子を説明変数とする蒸散量に対する回帰式を作成している。しかし、この実験で対象とした植栽は高さ 70cm くらいの小さな観葉植物で、環境因子の一つである照度値をある一定場所のものにしているため、実験室の環境と少しでも違う環境、観葉植物の配置、大きさの差がある場合については検討されていない。

よって本論文では、まず環境因子を変化させながら植栽の実験を行い、各条件下での蒸散量を計測した。ついで蒸散に最も影響を与える照度に注目し、植栽の樹冠内照度分布まで考慮した照度計算法を構築することで植栽の蒸散作用に関するモデル化を行い、植栽の大きさや葉面積密度の変化に対応して植栽の蒸散量を計算できるようにした。最後に、照度計算に基づく蒸散モデルと熱負荷計算を併用することで、植栽の蒸散が空調負荷に与える影響について、あるアトリウムを対象に、シミュレーションによるケーススタディーを行った。

本論文は、全 7 章で構成される。

第 1 章「序論」では、本研究の背景と目的を述べている。

第 2 章「緑化アトリウムの実態調査」では、室内緑化の実態把握のために、建築雑誌において 1981 年～1996 年に紹介された 373 個のアトリウムを持っている建物の中で、東京を中心とした緑化されたものを、計 25 件抽出し、実地調査ならびに文献調査を行った。そして、さらに室内空間における緑化手法についても述べている。アトリウムの形態、緑化された面積、植物の種類・大きさ・数・設置方法などを調査の項目とした結果、アトリウムの形態は中庭型が多く見られ、用

いられる樹木の種類はベンジャミンやヤシ類が一般的であることがわかった。

第3章「緑化アトリウムの現場実測」では、アトリウム内部に設置された植栽が室内温湿度環境や空調負荷に与える影響を定量的に評価することを目的として、東京にある緑化されたアトリウムを有する某ビルにおいて、2000年の夏季に実測を行った結果を報告している。

アトリウム内に発生する全体の潜熱の計測や、樹木を取り除いた場合との比較などは現実的に困難なので、同一建物における緑化されているアトリウムと緑化されていないアトリウムについて、シャッターの開閉と池の水の有無に関する組み合わせで三つの実測モード下で、アトリウム内の垂直温度湿度分布と、アトリウム内の負荷を処理している代表的な空調機について実測を行い、実態を把握した。その結果、緑化されたアトリウムにおいては、緑化されていないアトリウムと比べて、床付近での温度は低い一方で湿度は高くなる傾向が見られ、また池の水がある時には空調負荷の潜熱の割合が増加することを確認した。

第4章「植栽の蒸散作用に関する室内実験」では、室内緑化を行った際に室内の環境に大きな影響を与えるのは植栽の蒸散作用であり、その蒸散作用は空調の潜熱負荷に影響を与えるため、その性状を把握することを目的に行った実験について述べている。まず蒸散量に有意な影響を与える環境因子を確認し、蒸散量のモデル化を検討するために、温度・湿度・照度の三つを主因子とする実験計画法に基づく直交実験を人工環境室で行い、植栽の蒸散量の変化を計測した。その結果を元に、蒸散量を被説明変数、温度・湿度・照度を説明変数とする重回帰分析を行った結果、ベンジャミン大・小ともにいずれもよい相関を見せており、相関係数も0.96、0.95と良好であった。しかし、蒸散量に最も大きな影響を与えるのは照度であるが、ベンジャミン大とベンジャミン小で照度の係数を比較すると0.00109と0.00068で、同一種類の植栽であるにもかかわらず、大きく異なっていた。これは、説明変数の照度が樹冠の上部で計測したものをを用いているために、実際にそれぞれの葉にあたる照度はこれと異なっていること、ベンジャミン大が小に比べてその大きさの割に葉の数が少なく、その分だけ葉に光があたりやすいためと思われた。そこで、葉面積密度を考慮した樹冠内照度計算の必要性が明らかになった。

第5章「樹冠部及び室内照度分布の計算」では、4章で必要性が明らかになった室内植栽の照度分布のより正確な分析のため、従来の形態係数を用いる方法では評価が困難な、複雑な形状の物体同士の間でも柔軟な対応が可能であるモンテカルロ理論に基づいた照度分布の計算方法を示した。植栽の樹冠部をモデル化し、樹冠の葉面積密度が決められたら、そのモデル化に従い樹冠空間内に葉がランダムに配置されるようにした。本計算方法では、葉の平均照度が50,000回を超えたあたりから収束していることを確認した上で本章では計算回数を500,000回とした。そして、構築された照度計算方法で、第4章での実験データをもとに、各照度水準における実験対象植栽

の樹冠部に当たる照度値を葉一枚一枚に対して計算を行い、樹冠部平均照度値を算出した。その計算結果を用いて重回帰分析により、ベンジャミン大・小の樹冠内葉面積密度に影響されない重回帰式が算出することで、蒸散量に関する重回帰式の精度を高めることができた。

第6章「植栽の蒸散を組み込んだ空調負荷計算」では、5章で構築した照度計算法と植栽の蒸散作用に関するモデルを用いて、あるアトリウムを対象に、植栽の蒸散が空調負荷に与える影響を、照度と熱負荷計算を併用することで、シミュレーションによるケーススタディーを行った。熱負荷計算プログラムはGAEAを使用した。植栽がない場合とある場合のアトリウムの顕熱・潜熱空調負荷に関するシミュレーション結果の比較を行った。植栽がある場合の植栽条件としては、植栽の多少による影響を評価するため、樹木が小さい場合をCase1、大きい場合をCase2として、2通り評価し、植栽の密度が増えることで、空調負荷に有意な影響があることが確認できた。換気回数が本計算例よりも少ない（外気の流入が少ない）場合には、植栽による蒸散の影響はさらに大きくなることが予想され、アトリウム空間内などの室内で植栽を高密度で行う際には、潜熱増加の影響を考慮する必要があるものと思われる。

第7章「総括」では、全体のまとめを行うと共に、今後の課題などについて述べている。