RC 造建築物における屋上植栽の 室内熱環境の調整効果に関する研究

堀口 剛*1 梅干野昴*2 白井一義*3

A Study on Thermal Control Effects for Room by Rooftop Planting on RC Building

HORIGUCHI, Takeshi, HOYANO, Akira and SHIRAI, Kazuyoshi

要 目

屋上植栽による室内への熱環境調整効果は、植栽を含めた屋根の断面構造に加えて、建築の構造、居住者の生活様式、その地域の気象条件などによっても大きく異なると考えられる。そこで、本報では以下の2つの方法により、RC造建築に施された屋上植栽の室内に及ぼす熱環境調整効果を考察した。

はじめて、屋根の断面温度・熱流分布を中心に夏から冬にかけて実測調査し、屋上植栽の室内への熱環境調整効果を明らかにした。

つぎに、実測結果をもとに数値計算に必要な葉群層の熱的特性を明らかにするとともに、屋上断面構造として植栽の有無、盛土層の厚さ、土壌の含水状態、断熱材の有無等の種々の条件を設定して、室内気温を夏季と冬季で一定とした場合の各々1ヶ月間と、居住者によって室温が変化する場合の夏季の1日について数値計算を行った。その結果得られた天井表面温度と室内気温との差を指標にして、屋上植栽の室内熱環境調整効果について考察した。

1. はじめに

屋上植栽の熱的特性については、既に多くの研究がなされてきている。芝生試験体を製作し、その照り返し防止・焼け込み防止効果の検討を行ったものの¹⁾、芝生と芝生以外の土・コンクリート等との比較と、熱特性としての芝生の蒸発散作用に言及したも

の²⁾、さらにそれに加えて地盤内の伝熱シミュレーションを検討したもの³⁾、屋上植栽をパッシブ手法としてとらえ、その省エネルギー効果を考察したもの⁴⁾などがある。また、芝生以外の植栽地と机による日陰舗装地及び日向舗装地の比較による夏の日の蒸発散効果と日射遮蔽効果を述べたもの⁵⁾、人工軽量培地での草本、地被類の屋上から室内への熱流及び1日当たりの蒸散による潜熱を求めたもの⁶⁾がある。筆者らもすでに熱収支計算のために必要となる芝生葉群層の熱物性値に関する知見を得て^{7),8)}きたが、屋上植栽の室内熱環境調整効果を検討するためには、さらに、建築の構造、植栽基盤の構造、居住者の生活様式、気象条件や季節変化等も同時に考慮して検討することが必要であると考える。

そこで本報では、屋上植栽構造としてサツキが植

キーワード：屋上植栽，盛土層，断面温度分布，熱物性値，屋上構造，数値計算

Key words: Rooftop planting, Soil-Layer, Sectional Temperature Distribution, Thermal Property, Structure of Roof, Numerical Simulation

*1 東京工業大学大学院総合理工学研究科 日本セメント(株)

*2 東京工業大学大学院総合理工学研究科

*3 東京工業大学大学院総合理工学研究科

栽された厚い盛土層を持つRC造建築を対象として、居住者が実際に日常生活をしている状態を夏から冬にかけて実測し、冷暖房・照明等の居住者の生活による日々の変化や、季節による外気象の変化などをふまえた上での、屋上植栽による室内熱環境調整効果を把握する。次に、外気象と室内気温を入力条件として下記の数値計算を行うために、屋上植栽の伝熱モデル化を行い、必要なパラメータについてその値を実測結果から求める。さらに、屋上断面構造について①植栽の有無、②盛土層の厚さ、③土壌の含水状態、④断熱材の有無等の異なる場合を設定し、差分法を用いて数値計算を実行する。その結果求められた天井表面温度と室温の差を指標として、屋上植栽の室内熱環境調整効果を検討する。

2. 実測調査による夏から冬にかけての室内熱環境調整効果の検討

本章では屋上植栽としてサツキ植栽が施されたRC造建築物を対象として、屋上断面温度と熱流、盛土層の含水率、室内気温、外気象条件等を、居住者が日常生活をしている状態で夏から冬にかけて実測することにより、季節や居住者のライフスタイルを考慮した屋上植栽の室内熱環境の調整効果を考察する。

2.1 実測対象の概要

実測の対象としたのは、大阪の市街地の中に建設された実験集合住宅（写真1、図1）である。建物の概要は地上6階地下1階で、B1～2階までが鉄筋コンクリート造であり、3～6階がプレキャスト

コンクリート+鉄筋コンクリート造である。環境に対する配慮として中庭にはミニサンクチュアリ、ベランダ、屋上には植栽が施されており、低木、中木が植えられている。図1の平面図に示すように、今回の測定対象は最上階東側住戸とその屋上である。

対象とした屋上植栽は常緑低木のサツキツツジで高さは30～40 cm、植栽密度は9株/m²であり通常の植え込みの状態といえる。

盛土層にはパーライトを主原料とした超軽量の人工土壌を使用しており、盛土厚さは450 mmである。盛土層上部には合成樹脂系の保水材が20 mm 埋め込まれ、盛土層下部には排水層として150 mm パーライトが敷き込まれている。散水は、3回/日（1時、9時、17時）で、1回1 m²当たり夏期（8月13日～9月25日）には1.8 l、それ以外の季節（9月26日～1

写真1 実験集合住宅

Photo 1 Residential apartment building used for experiment

図1 屋上平面図

Fig. 1 Drawing of rooftop

月10日)は1.3 l の給水を行った。

対象室内の居住者は、夫婦2人家族で月～金曜日は昼間は不在のことが多い。天井には埋め込み式の照明灯 (60 W×9 箇所/26 m²) が埋設され、夜間帰宅時から就寝時まで点灯する。夏季在宅時の冷房設定温度は26°C、不在時は自動空調、冬季は暖房を自動し不在時は停止していた。

2.2 測定項目及び方法

断面温度の測定については、0.3 mmφ の T 型熱電対を使用し、熱流は80 mm×20 mm×厚さ2 mm の熱流計を用いた。サツキ葉群層表面温度は、葉群層の上方1.5 m に放射温度計を設置し測定した。土壌含水量の測定には pF 値を測定する土壌水分計を用い、土壌深さ70 mm と370 mm に設置した。

外気象としては、気温と湿度を屋上植栽付近に設置した百葉箱内の温湿度計で測定し、水平面全日

射量は屋上に取り付けた日射計で測定した。

実測期間は、夏から冬の期間、すなわち1995年8月13日から1996年1月10日迄行った。測定間隔は10分、データロガーを用いて自動計測し、パーソナルコンピュータに収録した。図2の屋上植栽断面図に各測定項目の測定機器設置位置を示す。

2.3 盛土層の含水率の長期変化

土壌深70 mm と370 mm における pF 値の8月から1月の変化を図3に示す。保水材が土壌上部に使用されていることと、1日3回定期的に散水していることによりその値は殆ど変化がなく、土壌の各部位の含水率は実測期間中はほぼ一定で、湿った状態であった。なお、pF 値は盛土層の上部の方が下部より常に高かった。

2.4 断面温度分布の日変化特性

晴天日が数日続いた、夏と冬の典型的な晴天日の断面温度分布の変化を図4に示す。

図4から夏季における昼間の葉群層上表面温度は、日射を受けているにもかかわらず、葉群層の蒸発散作用により日最高気温の時刻でも外気温よりわずかに上昇するだけであった。夜間から早朝にかけては放射冷却により外気温より低かった。土壌表面温度は、葉群層による日射遮蔽と、常時湿った状態による盛土層表面からの蒸発及び盛土層の熱容量により、サツキ葉群層上表面温度の日較差の9.5°Cに比べ3°Cと小さかった。また、盛土層が厚いため土壌最深部では日較差はなく、30°Cで一定であった。

以上のように、屋上植栽の葉群層による日射遮蔽効果、蒸発散作用及び盛土層表面の蒸発により、盛土層表面の温度の上昇がおさえられ、盛土層表面温度の日較差は葉群層表面よりも少なかった。

一方、室内と天井裏の温度変化を、室内気温・天井裏気温・外気温の8月の時刻別平均値として図5に示す。室内気温に注目すると、午前6時頃から上

図2 屋上植栽断面図

Fig. 2 Cross-sectional drawing of roof-top planting

図3 土壌 pF 値の長期変化

Fig. 3 Long-term changes in soil pF value

図4 断面温度分布

Fig.4 Cross-sectional temperature distribution

図5 8月における外気温・天井裏気温・室内気温の時刻別月平均値

Fig.5 Average monthly values for outdoor, space above ceiling and indoor temperatures at different times of day (August)

昇し始めた室内気温は午前10時頃に30°C近くになりそれ以後下がり始めた。これは朝東側の窓から日射が入射し室内気温が上昇するが、午前10時頃には太陽高度が高くなり日射の影響が少なくなり、室内の自動空調が働き始めて室内気温が下がるためである。天井裏気温は室内気温よりも高く、特に夕方から夜間にかけては、夕方居住者が帰宅して埋め込み式の照明器具を点灯するため、室内気温より2°C高かった。このように部屋の位置によって、外気象条

件により天井以外の壁や窓からの熱収支と、居住者の日常生活で生じる人工発生熱があるのが一般的であり、人工発生熱も含めた熱環境を考察する必要がある。

図4の夏季では、室内気温は自動空調と冷房により土壌最深部よりも温度が低く温度勾配は温度の高い方へ右上がりになる。しかし、天井裏気温と断熱材下温度で午後と夜間に温度の高い点があり、これが住人によって照明が点灯された時に当たる。特に断熱材下温度では照明器具による放射熱を受けることにより、土壌層にも室内側にも温度勾配が出来て熱流が上にも下にも流れる現象が起きている。

図4で冬季についてみると、サツキ葉群層上表面温度は昼間は外気温に比べわずかに低く、夜間では放射冷却により外気温より低かった。土壌表面温度の日較差は夏季と同様、葉群層上表面温度日較差よりも少なかった。土壌最深部温度の日較差は殆どなかったが、夏季と異なり外気温が室内気温よりも低いため、土壌最深部温度も低くなって天井裏気温と比較すると大きな温度勾配が見られた。

室内気温は暖房により土壌最深部よりも温度が高いが、断熱材によって断熱材下の温度は、室内気温とほとんど変わらなかった。夏季と同様に天井裏気温と断熱材下温度が夜間に高くなっている時間があ

り、これは照明灯によるものである。しかし、断熱材下温度は土壤最深部の温度が外気温の影響で低いため、夏季と異なり熱流は天井裏から流入して、土壤側に放熱する。

2.5 夏から冬にかけての長期変化

夏から冬にかけての土壤最深部温度と外気温、及び天井裏気温の、各日最高・最低値を図6に、図7に天井裏の断熱材下表面の熱流の日最大・最小値及び日積算熱流の変化を示す。

前節で検討したように土壤最深部の温度変化は、盛土層が厚いため日較差はほとんどないが長期的には外気温に追随し、8月初旬と12月下旬では 20°C の

図6 土壤最深部の日最高・最低温度の長期変化

Fig. 6 Long-term changes in daily maximum and minimum temperatures of deepest soil layer

図7 断熱材下表面熱流の日最大・最小値の長期変化

Fig. 7 Long-term changes in maximum and minimum heat-flow values on lower surface of insulation

差が生じていた。熱流は夏季の8月から9月中旬まではほとんどの日で盛土層側から室内側に流入しているが、その日積算量は $70 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{day}$ におさえられていた。天井裏気温の日最低温度が、 25°C 以上のパッシブクーリングを期待したい時期は図7からおよそ10月下旬までであるが、その時期には熱流が室内側から盛土層側に流出する日も多く、パッシブクーリング効果がみられる。11月以降では、外気温が下がるに従って熱流は、室内側からの流出量が増し、12月では常に室内側からの流出になり、暖房の点から室内熱環境の悪化を招くことになる。しかし、屋上植栽と厚い土壤層や断熱材によって室内側からの日積算熱流はおおよそ $300 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{day}$ 、熱流の日最大値は 15 W/m^2 に押さえられている。

3. サツキ屋上植栽の数値計算のためのモデル化とパラメータ等の設定

第2章で、特定条件下での屋上植栽の熱環境調整効果を実測により明らかにしたが、本章と次章では、更に屋上構造と室内気温及び外気象条件を入力条件として数値計算を実行し、屋上植栽の熱環境調整効果を考察する。

屋上植栽が室内の熱環境にどのような効果を与えているかは、室内気温の変化を考察することによりその効果を把握することができる。しかし、室内気温に作用する要素は多く、屋根からの熱流量だけでなく壁面や窓、床を通して熱貫流やすきま風などであり、また、住まい方による空調作動時間、空調設定温度、室内発熱量等がある。これらの要素全てを考慮して実測しても、結果としては複合されたものであり、屋上植栽による室内熱環境の調整効果を考察することが結果としては困難となる。

そこで、外気象条件に加えて室内気温も入力条件とし、室内気温に接している天井表面温度を数値計算によって求め、室内気温との差によって屋上植栽の室内熱環境調整効果を考察することとする。本章では、屋外からサツキ葉群層、盛土層、室内までの伝熱をモデル化し、数値計算に必要なパラメータを設定する。

3.1 伝熱モデル化

外気象条件と室内気温を入力条件として天井表面温度を数値計算から求めるには、屋外からサツキ葉群層、そして盛土層、室内天井表面から室内まで、図8に示すような伝熱モデルを設定して、同図の黒

図8 サツキ植栽伝熱モデル概念図

Fig. 8 Outline of azalea heat transmission model

点の位置に質点を設定した。

サツキ葉群層が直接的に影響する盛土層表面での熱収支式は盛土層内への等価的熱伝導率、葉群層の日射透過率、葉群層下表面温度、葉群層下表面と盛土層表面との間の気温と風速によって次式で表せる。

$$Gg = tj + \alpha c(\theta a - \theta g) + \sigma(Ts^4 - Tg^4) + W$$

Gg : 盛土層内への等価的熱伝導量 $[W/m^2]$

t : サツキ葉群層の日射透過率

j : 法線面直達日射及び天空日射 $[W/m^2]$

αc : 対流熱伝達率 $[W/m^2K]$

θa : 盛土層とサツキ葉群層間気温 $[^{\circ}C]$

Ts : サツキ葉群層下表面温度 $[K]$

$\theta g, Tg$: 盛土層表面温度 $[^{\circ}C, K]$

σ : シュテファン・ボルツマン常数 $[W/m^2K^4]$

W : 盛土層表面の蒸発量 $[W/m^2]$

※ Gg については、熱伝導の他に盛土層内の水分移動、水蒸気移動に伴う伝熱が存在するが、ここではこれらをすべて含めて、等価的熱伝導として

図9 サツキ葉群層の日射透過率

Fig. 9 Ratio of sunlight passing through azalea leaf-cluster layer

扱う。

※長波長放射収支については、土壌表面と葉群層表面はともに黒体と仮定した。

計算の入力条件は外気象条件として外気温、温度、水平面全天日射量、風速、および室内気温であることから、数値計算のため事前に検討しておかなければならないパラメータは①サツキ葉群層からの日射透過率、②盛土層表面日射反射、③サツキ葉群層と盛土層表面の放射授受の計算に必要なサツキ葉群層下面温度、④盛土層表面の対流熱伝達量を求めるためのサツキ葉群層と盛土層の間の気温及び風速（以下サツキ葉群層下風速とする）、⑤盛土層表面の蒸発量、である。さらに、盛土層の熱物性値として、土壌の等価的熱伝導率と容積比熱がある。

以下では第4章の数値計算で必要となる上記のパラメータについて検討する。

3.2 サツキ葉群層の日射透過率

サツキが植栽されている平面を25分割し、各測定点で午前、正午前後、午後の各時刻における、水平面全天日射量・サツキ葉群層透過日射量・土壌表面反射日射量を測定した。測定期間は夏季の1995年8月8～10日、冬季の1996年1月11～12日である。図9に日射透過率の算出結果を示す。日射透過率は夏季よりも冬季のほうが高かった。日射透過率を季節毎にほぼ一定と見なして、数値計算上では夏季4%、冬季9%とした。

盛土層表面反射日射量は、サツキ葉群層上表面の入射日射量の1%以下であったため、数値計算上で

図10 サツキ葉群層下気温と外気温の関係

Fig. 10 Relationship between temperature below azalea leaf-cluster layer and outdoor temperature

図11-1 屋上外部風速とサツキ葉群層下風速の関係
(1995年8月8日～9日・測定間隔1分)

Fig. 11-1 Relationship between exterior wind velocity and wind velocity below azalea leaf-cluster layer (1995/8/8-8/9)

はサツキ葉群層透過日射量はすべて盛土層表面で吸収するものとして扱った。

3.3 サツキ葉群層下表面温度

盛土層表面長波長放射授受は、サツキ葉群層によって上方を覆われているために、サツキ葉群層下表面との間で行われるとして扱った。前章の実測結果から葉群層上表面温度は外気温と比較して、日中は高く夜間は低いが、数度の範囲であることからサツキ葉群層下表面温度については、日射や大気放射の

図11-2 屋上外部風速とサツキ葉群層下風速の関係
(1995年1月10日～13日・測定間隔1分)

Fig. 11-2 Relationship between exterior wind velocity and wind velocity below azalea leaf-cluster layer (1996/1/10-1/13)

影響が少ないこと、などの理由から次節で求めるサツキ葉群層と盛土層の間の気温と等しいとした。

3.4 サツキ葉群層と盛土層の間の気温

典型的な晴天日における夏季と冬季のサツキ葉群層と盛土層との間の気温と、外気温の関係を図10に示す。サツキ葉群層と盛土層との間の気温は、夏季・冬季共にサツキ葉群層上の気温に比べ 2°C 程度低く直線関係にあった。

3.5 盛土層表面の対流熱伝達率

盛土層表面での対流熱伝達率に必要なサツキ葉群層下の風速を求めるにあたり、夏季の1995年8月8～9日、冬季の1996年1月10～13日の期間測定した

サツキ葉群層下と屋上上空の風速を図11-1, 図11-2に示す。

夏季ではサツキ葉群層下風速は, 周囲の中低木・サツキ葉群層による遮蔽の影響によりおよそ0.4 m/s以下であったので, サツキ葉群層下風速は常に0.4 m/sとした。冬季は夏季と違い, 周囲の多くの樹木が枯れて, 遮蔽物が少なくなったことからサツキ葉群層下風速は外部風速と相関がみられた。そこで, 外部風速との回帰分析を行い, サツキ葉群層下風速は図11-2に示した回帰式を用いて求めた。

さらに, 盛土層表面の対流熱伝達率はユルゲスの式⁹⁾を用いて求めた。

3.6 盛土層表面の蒸発量

盛土層表面には, 保水材が埋められており, 定期散水が行われていたため常に湿った状態であった。そこで, 数値計算においても盛土層表面は湿った状態として扱い, 盛土層表面蒸発量は自由水面と仮定したときの蒸発量に, 濡れ係数を0.7として乗じた値とした¹⁰⁾。

3.7 土壌の熱物性値の推定と検証

土壌の熱物性値は, その含水率によって変化するが, 実測により得られた土壌含水率は湿潤状態で一定であった。そこで次章の数値計算では, 土壌含水率は一定の湿った状態に保たれているとする。

この湿潤状態における土壌熱物性値を第2章の実測結果を用いて以下の方法で推定する。計算は差分法(クランクニコルソン法¹¹⁾)を用いて, 土壌表面と天井表面の熱流の実測値を境界条件として, 屋上植栽の断面温度日変化を求めることとし, その時の土壌両端(土壌表面・土壌最深部)の温度の計算値と実測値の誤差が最小になるように, 熱物性値を変化

図12 数値計算モデルの検証

Fig. 12 Verification of numerical simulation model

させて収束計算をおこない, 土壌熱物性値を推定した。推定計算で用いた実測値は, 降水後1日以上たった典型的な晴天日で, 気象条件, 室内気温が穏やかに変化する日を用いた。得られた等価的熱伝導率と容積比熱は, それぞれ, 0.28~0.31 W/mK, 1500~1800 kJ/m³Kの範囲であった。

さらに, 推定した上記の値と, 前述の伝熱モデルの設定について, その妥当性を検証した。検証には推定日の気象条件を境界条件として, 前述のモデルに入力し, 断面温度の1日の日変化を計算した。この計算値と実測値の比較の1例を図12に示す。実測値と計算値の平均誤差は0.5°C以内で一致した。

4. 数値計算による室内熱環境調整効果の検討

前章では数値計算に必要なサツキ屋上植栽のモデル化を行い, それらの熱物性値を求めた。本章では入力条件として外気象条件及び室内気温を設定して, いろいろな屋上の断面構造の場合について数値計算を行い, 屋上植栽の室内熱環境調整効果を考察する。

4.1 屋上構造条件の設定

屋上構造条件として, 室内の熱環境調整効果に影響を及ぼす項目としては植栽の有無の他に, 断熱材の有無, 盛土層の厚さや土壌の含水状態等が考えられることから, 図13に示す5パターンの断面構造について考察した。

No. 1は本研究で実測の対象とした屋上構造のうち, 排水層を除いたもので盛土層の下はコンクリート層であり, コンクリート層下の断熱材下は天井裏空間がなく直接天井表面である。盛土層の厚さは600 mm, コンクリート層は240 mmで断熱材は50 mmとした。No. 2はNo. 1の断面構造から断熱材を除いたものである。No. 3については, 盛土の層を80 mmと薄くし, 更に断熱材を除いたものである。No. 4はNo. 2と同じ構造で土壌の含水率が乾燥状態であるとした場合である。No. 5は, 植栽をしていないRC造建築屋根構造で押さえコンクリートに軽量コンクリート60 mmを使用し, コンクリート層は160 mm, 断熱材50 mmを使用した構造である。

コンクリート, 軽量コンクリート, 断熱材等の容積比熱・熱伝導率の値については, 文献値¹²⁾をもとに表1のように設定した。押さえコンクリートの表面は日射吸収率を0.8, 放射率を0.9とした。

室内側の熱伝達率は9.8 W/m²Kで一定とした。

図13 数値計算のための屋上構造パターン

Fig. 13 Roof-top planting structural pattern for numerical simulation

表 1 一般材料の熱物性値

Table 1 General material thermal property

材 料	熱伝導率 (W/mK)	容積比熱 (kJ/m³K)
コンクリート	1.6	2010
ウレタン	0.025	30
軽量コンクリート	0.524	1871

表 2 土壌熱物性値

Table 2 Soil thermal property

	等価的熱伝導率 (W/mK)	容積比熱 (kJ/m³K)
湿潤時	0.3	1600
乾燥時	0.1	1000

また、土壌含水率は前章で検討した湿潤状態とするが、土の乾湿の状態による違いを検討するために乾燥状態の場合を加える。なおここで乾燥状態の土壌の熱物性値は既往の文献¹³⁾から求め、湿潤状態の熱物性値とあわせて表2に示す。湿潤状態と乾燥状態の重量含水率は各々260%と100%であるが、数字

が大きいのは対象とした土壌が人工土壌でありパーライト（比重：0.6 Kg/l）を主体としているためである。

4.2 解析対象とした期間と入力条件

室内熱環境調整効果は第2章で明らかにしたように季節によっても異なる。そこで、本章では夏季（8月）冬季（12月）の各々1ヶ月間を解析の対象期間とした。入力条件の1つである外気象条件は、気温、絶対湿度、法線面直達日射量、天空日射量、夜間放射量、風速として、空気調和・衛生工学会空調負荷計算用標準気象データ（大阪）から得た。

もう1つの入力条件である室内気温については、夏季は冷房を使用するとして26℃一定、冬季は暖房を使用するとして18℃一定として設定した。なお、一般の住宅では夏季においては、冷房を常時使用しないことが多いため、午後から夜にかけて冷房した場合も加え、その日変化については、第2章の実測結果で得られた8月の典型的な晴天日の外気象条件と室内気温条件を与えた。

4.3 数値計算方法の概要

計算は差分法（クランク-ニコルソン法）を用いた。各層の温度の初期条件は、入力外気温の1日目の平均気温として設定した。刻み時間は10分とし、測点間の刻み幅は各材料ごとに刻み時間から、Courant条件を基準に出来るだけ精度が高くなるように設定した。長期変化の計算の際は、1週間程度の助走期間を設けて断面温度の履歴を十分計算した上で1ヶ月間の屋上植栽断面温度変化を求めた。日変化の計算の際は、1日周期の境界条件の連続計算を、計算断面温度が収束するまで行った。

4.4 計算結果及び考察

4.4.1 室内気温一定の場合

夏季と冬季1ヶ月間の各屋根構造における天井表面温度の比較を図14と図15に示す。

植栽されているNo.3と植栽のないNo.5を比較してみると、夏季については、天井表面温度の日較差は0.5℃であり、外気温の日較差およそ9℃に比べて殆どないと云える。1ヶ月を通してNo.3の方がNo.5よりも天井表面温度は、ほぼ0.5℃低く屋上植栽の効果が表れている。さらに、No.3は夜間に室内気温より低くなる日があり、パッシブクーリング効果があるといえる。冬季では、No.3とNo.5の天井表面温度の日較差は0.5～1℃で外気温の日較差10℃に比べ殆どないと云えるが、No.3の方がNo.5

図14 8月室内気温一定(26°C)のときの屋上植栽構造の違いによる天井表面温度の比較

Fig. 14 Comparison of changes in ceiling surface temperature resulting from differences in roof-top planting structure under constant (26°C) indoor temperature conditions during August

よりも天井表面温度は室内気温に比べて1°C低い。これは夏季よりも冬季の方が外気温と室内気温の差が大きく、No. 5の断熱材の効果があらわれている。

次に、同じ600 mmの厚い盛土層を持つNo. 1, No. 2, No. 4では、夏季、冬季ともに天井表面温度はほとんど変わらず、室内気温との差は0.1°C以内でほぼ等しい。このことは、土壌含水率の違いは殆ど影響せず、断熱材の有無による効果等もほとんどみられず、厚い盛土層とサツキ葉群層の日射遮蔽効果及び蒸発散作用による効果が大いといえる。

4.4.2 室内気温が変化する場合

図16に夏季の晴天日における外気温、室内気温及び天井表面温度の時間変化を示す。まずはじめに、設定した室内気温の日変化の特徴を述べておく。午前中は冷房していないため午前6時過ぎから室内気温が上昇している。10時頃までは窓から日射が侵入

図15 12月室内気温一定(18°C)のときの屋上植栽構造の違いによる天井表面温度の比較

Fig. 15 Comparison of changes in ceiling surface temperature resulting from differences in roof-top planting structure under constant (18°C) indoor temperature conditions during December

図16 8月自然室温のときの屋上植栽構造の違いによる天井表面温度の日変化

Fig. 16 Daily changes in ceiling surface temperature resulting from differences in roof-top planting structure under natural indoor temperature conditions during August

するため、自動空調が作動しているにもかかわらず室内気温は30℃近くまで上昇する。10時以降は日射があたらず室内気温は下がりはじめ、21時頃が最低で28℃となる。

つぎに、計算結果を述べる。植栽のある No. 3 の天井表面温度は、盛土厚が80 mm と薄いにもかかわらず、外気温の高い6時から15時の間では、600 mm の厚い盛土層をもつ No. 2, No. 4 の天井表面温度と比べ殆ど同じであり、室内気温よりも低く推移している。これは、外気温が高くなっても植栽による日射遮蔽効果と葉群層の蒸発散作用及び盛土層表面からの蒸発により盛土層の温度上昇が抑えられ、室内気温が上昇した時に、熱を屋上植栽層に逃がすパッシブクーリング効果により、天井表面温度は低く抑えられているためである。

植栽のない No. 5 の天井表面温度は、昼間外気温の上昇とともに温度が上がり始め10時頃の室内気温の最高時の温度よりも上昇し最高30℃に達する。さらに、室内気温が下がってもコンクリートの熱容量により天井表面温度はほとんど下らない。

屋上植栽があり断熱材を持つ No. 1 では、屋上植栽による盛土層の温度上昇が抑えられているにもかかわらず、日中室内気温が上昇した時に断熱材によって室内気温の上昇を盛土層側に放熱できないために、6時から15時の間では、同じ屋上植栽のある No. 2, No. 3, No. 4 に比較して、室内気温に追従して天井表面温度が高くなっている。

これに比べ No. 2, No. 4 では断熱材がないため、No. 3 と同様昼間室内気温が上昇した時にその熱量を盛土層側に放熱することにより、天井表面温度は上昇しない。

5. まとめ

本研究では、まず、サツキ屋上植栽が施され、盛土層が厚く、断熱材のある RC 造建築物を対象に実測を行い以下の点を明らかにした。

1. 夏季において葉群層上表面温度は、葉群層の日射遮蔽と蒸発散作用により日中外気温と比較して数度しか高くない。
2. 盛土層表面温度の日較差は、葉群層の日射遮蔽と盛土層が常に湿潤状態にある為の蒸発によって葉群層表面温度の日較差に比べて小さい。
3. 屋上植栽の日射遮蔽と蒸発散作用及び盛土層表面の蒸発作用と厚い盛土層により土壌最深部温度

の日変化は見られず、ほぼ一定であった。

4. 8 月では熱流はほとんど盛土層側から室内側へと流入するがその日積算量は70 kJ/m²day に抑えられていた。9 月以降天井裏気温の最低値が25℃以上の温度でパッシブクーリング効果を期待したい時期では熱流は室内側から盛土層側に放熱する日が多くパッシブクーリング効果が行われていた。

5. 11 月以降は外気温が低くなり熱流は室内側からの流出がほとんどとなるが、屋上植栽と断熱材により日積算熱流は300 kJ/m²day に抑えられている。

次に、数値計算によって屋上植栽の室内熱環境調整効果を考察するが、数値計算に先だち、サツキ葉群層が盛土層表面における熱収支に及ぼす影響を表現できる伝熱モデルを設定し、そのモデルに沿った数値計算に必要なパラメータについてその値を求めた。

さらに、数値計算の対象とする屋上構造条件は、実測結果をもとに屋上植栽の有無、断熱材の有無、盛土層の厚さ、盛土層の含水率の違いを考慮して設定した。

入力条件として室内気温を夏季冷房温度26℃、冬季暖房温度18℃一定として、8 月と12月の各々1ヶ月の期間を対象として外気象を与えて数値計算を行った。また、8 月の典型的な晴天日を取り上げ冷房を午後から夜にかけて使用した場合の1日の温度変化のある室内気温を設定して数値計算を行った。以下に数値計算の結果を述べる。

①室温を一定とした場合には、盛土層が80 mm と薄い場合と植栽がなく断熱材のある場合は、両方とも外気温と日射量に対応した日変化が生じる。しかし、植栽のある場合は夏季においてパッシブクーリング効果が生じる日がある。冬季は断熱材のあるほうが天井表面温度の低下が少なかった。厚い盛土層の屋上植栽構造は、植栽による蒸発散作用と日射遮蔽及び盛土層表面からの蒸発作用と、600 mm の厚い盛土層の熱容量により、夏季・冬季共に外気温の影響を殆ど受けない。

②室温を変化させた場合は、植栽のある薄い盛土層も厚い盛土層でも、植栽の効果及び盛土層表面からの蒸発作用の影響で、室内気温が上昇してもパッシブクーリング効果により天井表面温度は上昇しない。植栽のない場合は日中吸収された日射熱等がコ

ンクリートの熱容量により蓄えられ夜間も温度が高い。また、植栽のある場合でも断熱材があると室内気温の上昇時にコンクリート及び盛土層への放熱が出来ず、室温と同様な温度上昇を示した。

附 記

※ クランク-ニコルソン法

熱伝導方程式の解法の1つである差分法において、熱フラックスは平均温度から求められる。平均温度は各要素の節点における温度から求めるが、その時の式は次式で与えられ式中の重み係数 η が0.5の場合は、新旧の温度の平均が熱フラックスの計算に用いられ(時間)中心差分法またはクランク-ニコルソン法と呼ばれる。

$$\bar{T} = \eta T^{j+1} + (1 - \eta) T^j$$

※ ユルゲスの式

ユルゲスが提案した対流熱伝達率の実験式。対象となる面の表面状態により粗面と普通面に分け、普通面の場合は風速によって以下のように回帰式を与えている。

$$\alpha c = 5.0 + 3.4 v \quad (v \leq 5 \text{ m/s})$$

$$\alpha c = 6.14 v^{0.78} \quad (v > 5 \text{ m/s})$$

αc : 対流熱伝達率

v : 風速

謝 辞

本研究は、大阪ガス(株)との共同研究であり、大阪ガス(株)の勝瀬 進氏、志波 徹氏両氏には、多大なご協力を頂いたことをここに記して、感謝の意を表します。

引用文献

- 1) 梅干野, 他: 屋上植栽による照り返し防止・焼け込

み防止効果, 日本建築学会建築工学論文集, pp. 133-140, 1983

- 2) 洞田, 他: 屋上緑化面の熱特性に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), pp. 73-74, 1995
- 3) 三小田, 他: 屋上芝生植栽の導入効果に関する実験的研究その1, その2, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), pp. 1525-1526, 1993, (東海), pp. 439-440, 1994
- 4) 石原, 他: パッシブ手法による夏季の省エネルギー効果に関する研究, 第2報, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 57, pp. 63-71, 1995
- 5) 野島, 他: 屋上緑化による夏期の建築物および熱負荷の軽減効果の実証的研究, 日本緑化工学会誌, 第20巻, 第3号, pp. 168-176, 1995
- 6) Harazono, Y, et al: Effects of rooftop vegetation using artificial substrates on the urban climate and the thermal load of buildings, Energy and Buildings, 15(3-4), pp. 435-442, 1991
- 7) 梅干野, 他: 芝生葉群層の熱収支特性に関する実験研究, 日本建築学会計画系論文集, 第452号, pp. 31-39, 1994
- 8) 堀口, 他: 芝生植栽の水収支特性に関する実験研究, 日本建築学会計画系論文集, 第483号, pp. 73-80, 1996
- 9) 渡辺 要: 建築計画原論II, 丸善, pp. 63-64, 1997
- 10) 尾島, 他: 地域環境アセスメントにおける地表面熱収支理論の応用研究第2報 地表面熱収支の計算法と実測, 日本建築学会論文報告集, 第265号, pp. 93-103, 1978
- 11) ゲイロン S. キャンベル: パソコンで学ぶ土の物理学, 鹿島出版会, pp. 28, 1993
- 12) 松尾, 他: 空調設備の動的熱負荷計算入門, 建築設備技術者協会, pp. 55, 1993
- 13) 日本機械学会編: 伝熱工学資料 第4版, 丸善(株), 1986

(1997. 5. 8受理)

Summary

Rooftop planting has thermal control effects on indoor environment. The effects, however, very greatly according to the building structure, residents' daily activities, and local meteorological conditions as well as with the planting structure. The present paper uses two approaches to discuss the thermal control effects of rooftop planting on the indoor environment of reinforced-concrete (RC) building.

First, we selected occupied RC building for a survey. From summer to winter, we measured the cross-sectional temperature and heat flow distribution from the roof to the occupied room. By reviewing the

results of this survey, we clarified the thermal control effects of rooftop planting under conditions dictated by residents' daily activities, planting structure, and building structure.

Then we simulated numerically different room temperature conditions and sectional structures of roofs, including the soil layer thickness, water content, heat insulating material, and rooftop planting. Through this simulation, we calculated the long-term and daily changes of the room-side surface temperature of the ceiling. Using the simulation data as indices, we discuss the control effects of rooftop planting on the indoor thermal environment.