

形状が異なる中庭空間の温熱環境の実測と予測

Measurement and prediction of thermal environment of courtyard spaces of different shapes

建築学専攻 原田研究室 平山晃

1. 序論

中庭をはじめとする屋外空間（以下、単に中庭）は多くの建築物に付帯して設けられており、周囲の建物の温熱環境やそこを利用する人々の快適な温熱環境形成に寄与する。そこでは中庭外部の気象条件、日射や長波放射の入射、地表面被覆を構成する材料、中庭空間とその周辺の建物の形状が温熱環境に影響を与える。様々な中庭形状に応じてその温熱環境を予測することは、中庭空間の設計をする上で重要である。

本研究では、①異なる形状と表面被覆を有する中庭空間の温熱環境の実測を行い、建物外部の気象と比べて、それぞれの温熱環境が形成されるメカニズムを明らかにすること、②中庭空間の温熱環境を解析する予測モデルを用いて暑熱低減の方法を検討するケーススタディを行い、快適な温熱環境を創出するための指針を得ることを目的とする。

2. 形状が異なる中庭空間の温熱環境の実測調査

2.1 実測の概要

調査対象の建物は京都市内にあるホテルと商業施設を備えた複合施設である。図1に調査対象建物の配置図を図2に断面線AA'で切り取った断面図を示す。この建物には3つの形状が異なる中庭空間（中庭、屋上庭園、ポイド）と建物屋上にて温熱環境の実測を行った。

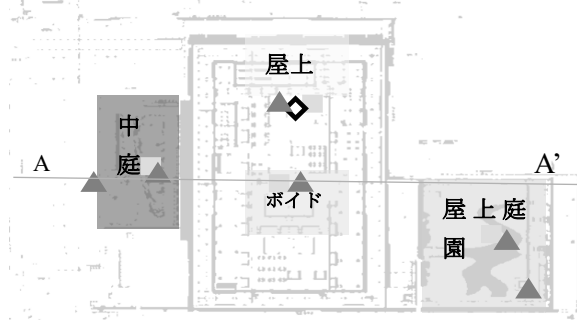


図1 調査対象建物の配置図

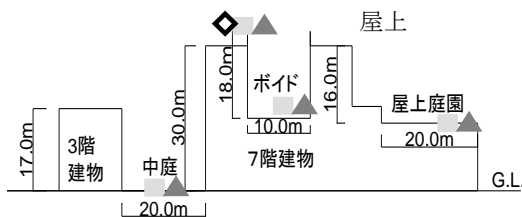


図2 調査対象建物の簡易断面図AA'

2.2 実測の方法

測定項目は①気温、②湿度、③日射量（鉛直面および

水平面)、④風速風向である。測定に用いた機器はウェザーステーション、照度計付きおんどとり、アルベドメーターである。図1および図2に測定に用いた機器を使用した地点を示している。

表1 測定機器と測定項目と測定地点

測定機器	測定項目	測定場所	記号
ウェザーステーション	・気温 ・相対湿度 ・風速 ・風向	・建物屋上 ・ポイドの底部 ・中庭地面 ・屋上庭園地面	■
照度計付きおんどとり	・全天空照度 ・温湿度	・中庭地面 ・建物屋上 ・屋上庭園の地面 ・屋上庭園のハト小屋 ・各階のポイドの室内側	▲
アルベドメーター	・全日射量 ・地面反射日射量	・屋上	◇

2.3 測定結果

2.2節で述べた地点における9月15日晴天日における、気温、絶対湿度、水平面日射量、風速の測定結果を図3~6に示す。図3に示す気温では、屋上の気温が最も高く変動していた。ポイドは地面の面積に対して壁が高く日射入射が小さくなっており、屋上庭園および中庭では樹木により温熱環境が緩和されていた。また中庭では周辺店舗からの冷気が流入しており、最も温度が低かった。

図4に示す絶対湿度の測定結果では、気温が高い12時から15時の間、屋上庭園で最も高く、夜間は屋上庭園と中庭が低かった。これは、日中は樹木からの水分蒸発によって空気中の水分量が上昇し、夜間は空気の水分を奪っているためである。

図5に示す水平面日射量の測定結果では、測定日は快晴でほぼ曇りがなかった。屋上庭園ハト小屋では午前中は遮蔽物がないために屋上の変動に近く変動しているが、11時を過ぎると西側建物の影響で減少している。中庭では東側建物が西側建物よりも高いため、午前中の測定値は午後の測定値よりも低く変動していた。

図6に示す風速では、屋上では秒速1から4mで変動しており、屋上風速に対して屋上庭園では約0.17倍、ポイドでは約0.19倍で変動していた。

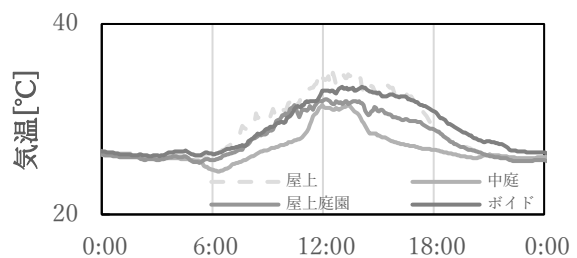


図3 屋上と3つの中庭の気温の測定結果

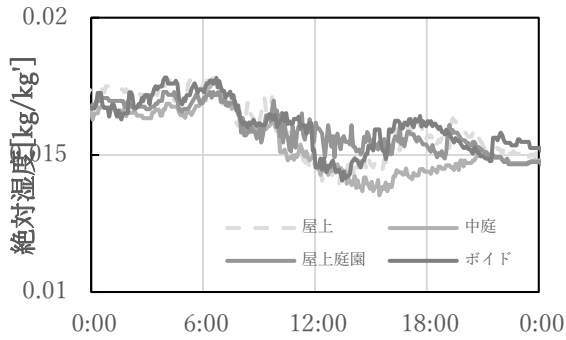


図4 屋上と3つの中庭の絶対湿度の測定結果

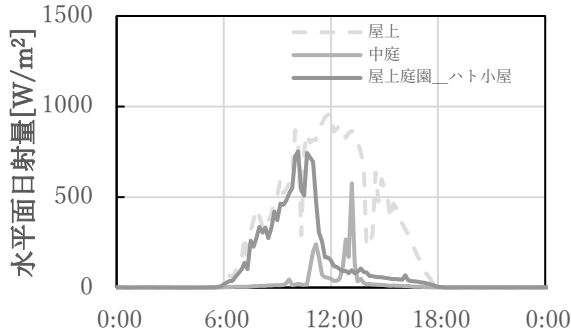


図5 屋上と3つの中庭での水平面日射量の測定結果

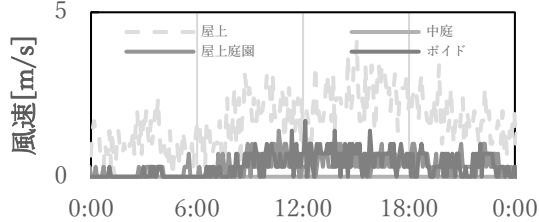


図6 屋上と3つの中庭での風速の測定結果

3. 中庭空間の温熱環境の予測

3.1 予測方法

予測方法の概要を図7に示す。中庭へ入射した日射および長波放射が吸収され、表面温度および中庭の気温を上昇させる。このとき、地盤面が湿潤状態であれば、吸収された熱量の一部は潜熱として吸収され、中庭の湿度を上昇させる。中庭空気に吸収された熱量および水分量の一部は通風により排出される。

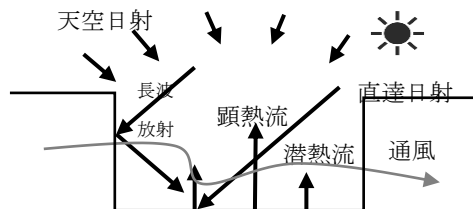


図7 中庭の温熱環境の予測の概要

図8に、計算の流れを示す。求める気象要素は表面に入射する日射と長波放射、中庭の気温と湿度、中庭の構成面の表面温度である。日射と長波放射については、面間の相互反射^[1]により求めた。なお日射および長波放射の計算では樹冠を薄膜と仮定して、薄膜と壁面の間

での多重反射を考慮した。気温と湿度については中庭空気を樹冠より上側と下側に分けた2質点で表して、図9に示す熱収支と水分収支から求めた。地盤温度については、一次元の熱伝導により求めた。風速は、中庭外部での測定値に、実測で求めた風速比を掛けて計算した。

以上の方法で求めた中庭での気象要素を用いて、図10に示すように人体を直方体と仮定して中庭での人体への平均放射温度を計算し、中庭の温湿度・風速・平均放射温度の計算値と、代謝量、着衣量からASHRAE規準^[2]の方法でSET*を計算した。式(1)~(10)に主な計算式を示す。

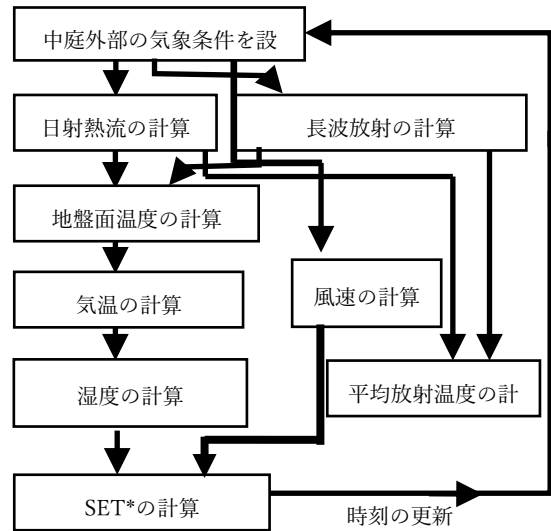


図8 中庭の温熱環境の計算の流れ

(1) 日射・長波放射・構成面温度の計算

$$J_{inc,i} = J_{dn} \cos(\overline{J_{dn}}, \overline{n_i}) + \sum_{j=1}^n F_{j,i} J_{sky} + \sum_{j=1}^n (1 - a_{s,j} - \tau_{s,j}) F_{j,i} J_{inc,j} \quad (1)$$

$$q_{inc,i} = \sum_{j=1}^n F_{j,i} q_{sky} + \sum_{j=1}^n F_{j,i} \{ \sigma \varepsilon_{r,j} T_{j,i}^4 + (1 - \varepsilon_{r,j}) q_{inc,j} \} \quad (2)$$

$$\rho_{j,1} c_{j,1} \frac{\Delta x_{j,1,2}}{2} \frac{dT_{j,1}}{dt} = a_j + \varepsilon_j q_j - \varepsilon_j \sigma T_{j,1}^4 - h_c (T_{j,1} - T_{air}) - f_j h' L (P_{s,j} - P_{s,air}) - \frac{k_{j,1,2}}{\Delta x_{j,1,2}} (T_{j,1} - T_{j,2}) \quad (3)$$

(2) 中庭の熱収支および水分収支の計算

$$\rho c_p A_{bot} H_{cr} \frac{\partial T_{low}}{\partial t} = \sum_{j=1}^{N_{gr}+N_{low}} h_c A_j (T_{s,j} - T_{low}) + \sum_{j=1}^{N_{cr}} h_c (1 - \tau_{tree}) A_j (T_{cr,j} - T_{low}) + \rho c_p V_{low} (T_{out} - T_{low}) + \rho c_p V_{ht} (T_{high} - T_{low}) \quad (4)$$

$$\rho A_{bot} H_{cr} \frac{\partial x_{low}}{\partial t} = \sum_{j=1}^{N_{gr}+N_{low}} h_v A_j f_j (p_{s,j} - p_{low}) + \sum_{j=1}^{N_{cr}} h_v (1 - \tau_{tree}) A_j (p_{cr,j} - p_{low}) + \rho V_{low} (x_{out} - x_{low}) + \rho V_{ht} (x_{high} - x_{low}) \quad (5)$$

$$\rho c_p A_{bot} (H - H_{cr}) \frac{\partial T_{high}}{\partial t} = \sum_{j=1}^{N_{high}} h_c A_j (T_{s,j} - T_{high}) + \sum_{j=1}^{N_{cr}} h_c (1 - \tau_{tree}) A_j (T_{cr,j} - T_{high}) + \rho c_p (V_{high} + V_{ho}) (T_{out} - T_{high}) + \rho c_p V_{ht} (T_{low} - T_{high}) \quad (6)$$

$$\rho A_{bot} (H - H_{cr}) \frac{\partial x_{high}}{\partial t} = \sum_{j=1}^{N_{high}} h_v A_j (p_{s,j} - p_{high}) + \sum_{j=1}^{N_{cr}} h_v (1 - \tau_{tree}) A_j (p_{cr,j} - p_{high}) + \rho (V_{high} + V_{ho}) (x_{out} - x_{high}) + \rho V_{ht} (x_{low} - x_{high}) \quad (7)$$

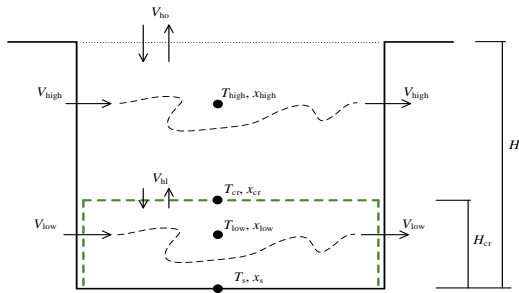


図9 中庭空気の熱・水分収支

(3)平均放射温度の計算

$$q_k = J_{dn} \cos(\vec{J}_{dn}, \vec{n}_k) + \sum_{j=1}^n F_{j,k} (J_{out,j} + q_{out,j}) \quad (8)$$

$$q_T = \frac{\sum_{k=1}^6 S_k q_k}{\sum_{k=1}^6 S_k} \quad (9)$$

$$t_r = (q_T / \sigma)^{1/4} - 273.16 \quad (10)$$

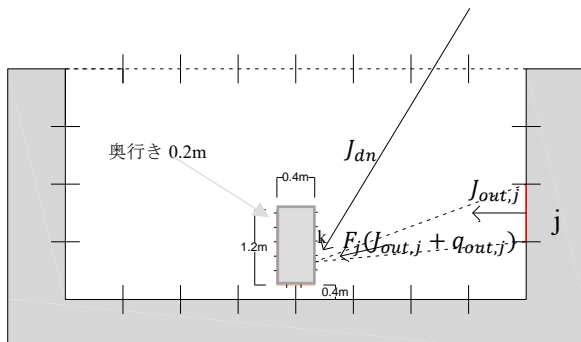


図10 人体表面に入射する放射熱流

4. 中庭での計算結果

4.1 計算条件

2章で述べた中庭を対象として温熱環境の予測を行った。晴天日(9/15)における中庭外部の気象要素(屋上で測定した法線面日射量、天空日射量、気温、絶対湿度、風速)を気象条件として計算に用いた。図11に計算に用いた中庭形状を示す。対象となる中庭を幅奥行高さ方向に10×10×5の計400個の要素に分割して計算した。なお樹冠高さを4m、樹冠の空隙率を0.69、地表面は乾燥しているとして濡れ率0を与えた。

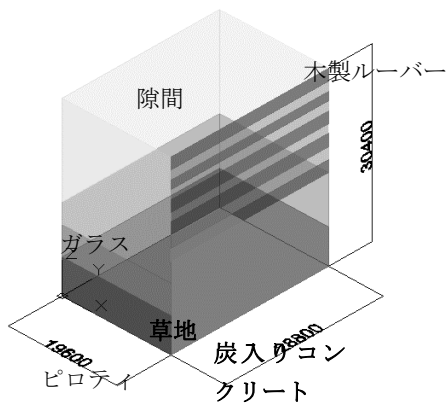


図11 中庭の形状モデル

4.2 計算結果

中庭の気温、絶対湿度の計算結果を図12、図13に示す。中庭の気温の計算値は日中屋上の気温を上回っており、12時で約3℃の差があった。また樹冠温度は30℃前後で変動しており、草地表面温度は日中で61℃程度まで上昇した。絶対湿度は日中で樹冠からの水分蒸発があるため屋上の測定値を上回っていた。中庭の樹冠上端に入射する日射量の計算結果を図14に、樹冠上端に入射する長波放射の計算結果を図15に示す。中庭地面の中央と東西南北の地点での結果を取り上げる。東西南北地点では建物の日射遮蔽の効果がみられる。北と中央の地点では外部の日射量とほぼ同じ変動をしていた。長波放射は日射が当たって地表の高温化がみられる北側で最も高く変動していた。直達日射がみられなくなる14時30分以降は、長波放射に50W/m²の減少がみられた。

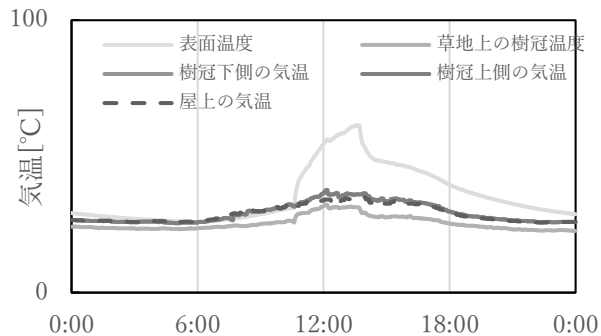


図12 中庭の気温の計算結果と屋上の測定値

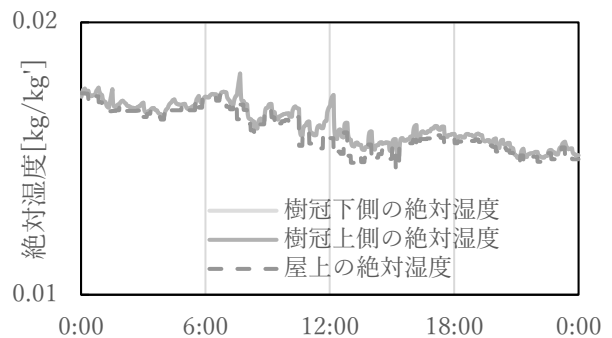


図13 中庭の絶対湿度の計算結果と屋上の測定値

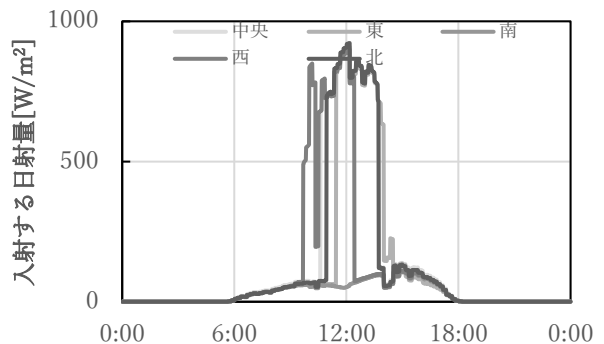


図14 樹冠上端に入射する日射量の計算結果

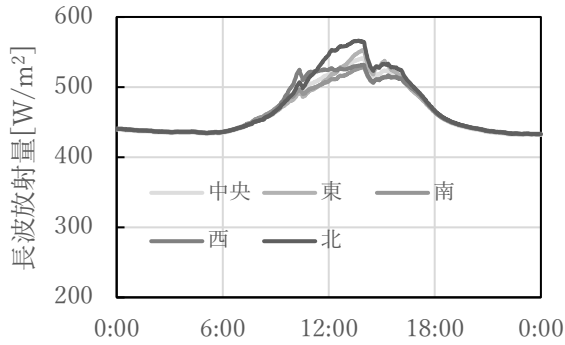


図 15 樹冠上端に入射する長波放射量の計算結果

5. 予測モデルを用いた暑熱低減の方法の検討

夏期の暑熱化を低減する手法を検討するため、ケーススタディを行った。

5.1 検討項目

表 2 に検討項目を示す。4 章の計算条件を基準として被覆状態を変化させるケーススタディを行った。

表 2 検討項目

検討項目	被覆状態を変化	
	ケース 1-1	ケース 1-2
変化させる条件	中庭の壁面ガラス部分をすべて木製ルーバーで覆う	中庭の草地在り濡れている
変化する条件	寸法はそのままガラスの物性値をスギの物性値に変更	地表面濡れ率 w を 0 から 1 に変更

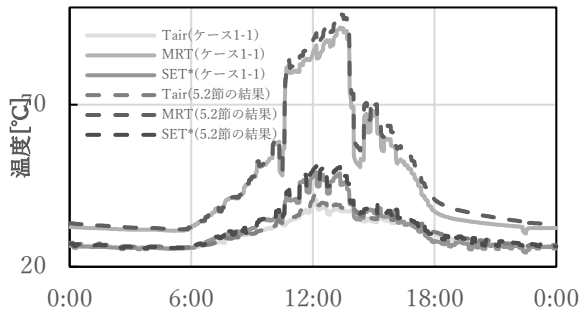


図 16 ケース 1-1 の気温、MRT、SET* の計算結果

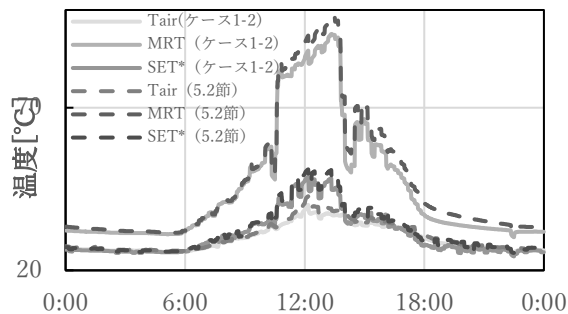


図 17 ケース 1-2 の気温、MRT、SET* の計算結果

5.2 計算結果

図 16 にケース 1-1 での、図 17 にケース 1-2 での気温、MRT、SET* の計算結果を示す。放射率の小さい木製ルーバーに変更したところ、気温が約 0.2°C、MRT が約 5°C、SET* が約 1°C 低減した。草地在り湿潤状態を仮定して計算すると、気温が約 0.2°C、MRT が約 5°C、SET* が約 1°C 低下した。

6. 結論

本研究では 3 つの異なる形状を持った中庭空間の実測調査および実測を行った中庭を対象として温熱環境の予測を行い、以下の結果を得た。①実測結果について 3 つの異なる中庭空間で建物屋上の気温よりも低く変動しており、特に中庭では冷房気流の影響がみられた。②中庭および屋上庭園では樹木による水分の調湿効果がみられた。③樹木の影響を考慮した本予測モデルでは、壁面を放射率が低い素材に変更、地表面を湿潤状態に、また樹木の密度を上げると気温、MRT、SET* の低減効果がみられた。

【記号一覧】 J_{dn} : 法線面直達日射量 [W/m^2], \vec{J}_{dn} : 直達日射の方向ベクトル, \vec{n}_i : 要素 i の内向き法線ベクトル, F_{ji} : 要素 i から要素 j を見たときの形態係数, J_{sky} : 天空日射量 [W/m^2], $a_{s,j}$: 要素 j の日射吸収率, $\tau_{s,i}$: 要素 i の日射の透過率, $J_{inc,j}$: 要素 j に入射する日射熱流 [W/m^2], q_{sky} : 大気放射量 [W/m^2], σ : ステファン・ボルツマン定数 [W/m^2K^4], $\epsilon_{r,j}$: 要素 j の構成材料の放射率, T_j : 要素 j の表面温度 [K], $q_{inc,j}$: 要素 j に入射する長波放射熱流 [W/m^2], ρ : 材料の密度 [kg/m^3], c : 材料の比熱 [$J/(kgK)$], $\Delta x_{j,1,2}$: 節点 1,2 の間隔 [m], h_c : 対流熱伝達率 [W/m^2K], T_{air} : 空気温度 [K], f_j : 要素 j 表面の濡れ率, h' : 水蒸気伝達率 [$kg/(m^2 \cdot s \cdot Pa)$], L : 水の蒸発熱 [J/kg], $P_{s,j}$: 要素 j の表面の飽和蒸気圧 [Pa], $P_{s,air}$: 中庭空気の飽和蒸気圧 [Pa], $k_{j,1,2}$: 要素 j のコントロールボリューム 1 と 2 の間の有効熱伝導率 [W/mK], A_{bot} : 中庭の底面積 [m^2], A_j : 要素 j の面積 [m^2], H_{cr} : 樹冠上縁までの高さ [m], N_{cr} : 樹冠を有する要素の数, N_{gr} : 地面要素の数, N_{low} : 樹冠上縁よりも下にある壁面要素の数, $T_{cr,j}$: 要素 j の樹冠温度 [K], T_{high} : 外部空間の温度 [K], T_{low} : 樹冠より下部の気温 [K], T_{out} : 外部空間の温度 [K], V_{ht} : 中庭上部との気流の交換による換気量 [m^3/s], V_{low} : 樹冠より下部での通風による換気量 [m^3/s], τ_{tree} : 樹冠の空隙率, H : 樹冠上縁から中庭最上部までの高さ [m], T_{high} : 樹冠より上部の気温 [K], N_{high} : 樹冠より上部にある壁面要素の数, V_{high} : 樹冠より上部での通風による換気量 [m^3/s], V_{ho} : 中庭上部と外部との気流の交換による換気量 [m^3/s], h_v : 水蒸気伝達率 [$kg/(m^2 \cdot s \cdot Pa)$], $p_{cr,j}$: 要素 j の樹冠温度における飽和水蒸気圧 [Pa], p_{low} : 樹冠より下部の空気の水蒸気圧 [Pa], $p_{s,j}$: 要素 j の表面温度における飽和水蒸気 [Pa], x_{high} : 樹冠より上部の空気の絶対湿度 [kg/kg], x_{low} : 樹冠より下部の空気の絶対湿度 [kg/kg], x_{out} : 外部空間の空気の絶対湿度 [kg/kg], p_{high} : 樹冠より上部の空気の水蒸気圧 [Pa], \vec{n}_k : 人体表面の要素 k の内向き法線ベクトル, q_k : 人体の表面 k に入射する放射熱流 [W/m^2], S_k : 要素 k の面積 [m^2], q_r : 人体に入射する平均放射熱流 [W/m^2], t_r : 平均放射温度 [$^{\circ}C$]

【参考文献】

- [1] 松浦邦男他: 建築環境工学 I—日照・光・音—, 2001 年, p93
- [2] SET*: ASHRAE STANDARDS COMMITTEE 2017-2018: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, ASHRAE Standard 55, 2017