

中庭空間の温熱環境の実測と予測

Measurement and estimation of thermal environment of a courtyard

建築学専攻 原田研究室 段宇恵

1. 序論

中庭空間は環境緩和装置として多くの建物に設置されており、周囲の建物の温熱環境や中庭を利用する人々の快適性に多大な影響を与えている。そのため、様々な季節と気象条件における中庭状空間の温熱環境を把握し、これが周囲の建物へ及ぼす影響を定量化することは建築とその周辺空間の環境を総合的に制御する観点から重要である。

そこで本研究では、中庭状空間の温熱環境を支配する要因を把握するため、日射量、温湿度、風速、風向、照度、降水量などの気象要素を実在中庭空間で測定した。実測結果に基づき、中庭の温熱環境の熱収支を定量化することが目的の一つである。また、中庭の温熱環境のシミュレーションを行い、様々な気象条件における中庭の温熱環境を予測する方法を構築する。この方法を用いて、表面の素材を変化させた場合の影響を予測した。

2. 中庭空間における温熱環境の実測

2.1 測定目的

以下の3つの目的で測定を行った。

- (1)対象となる中庭の温熱環境の実態を把握すること。
- (2)中庭の熱収支に関するパラメーターを算出すること。
- (3)中庭の温熱環境の予測を行うために必要な気象条件を得ること。

2.2 測定対象

測定対象は、京都市西京区にある大学キャンパスの中庭である。中庭の概要を図1に示す。東側・西側・北側の三方を3～5階建ての建物に囲まれており、南側には1階建ての建物が位置している。

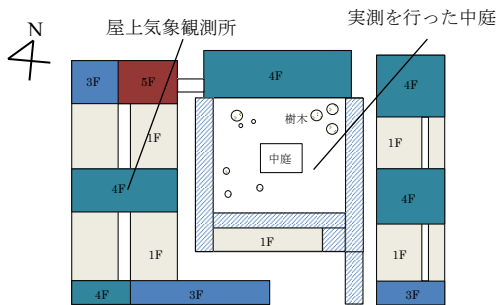


図1 実測を行った中庭の概略図

2.3 測定期間

実測期間は、2018年9月23日～9月24日18時までの2日間および2019年7月17日～7月24日18時までの8日間である。実測期間の天気は、2018年9月23～24日は、降雨がなく、曇り時々晴れであった。2019年7月18

～23日は雨と曇りであった。7月19日と22日は、一日の降雨量がかかなり大きく、26.5mm～27mmとなった。7月24日の天気は、昼間は晴れ、夜間は曇りであった。

2.4 測定項目

以下の8種類の実測を行った。①気温(測定機器固定)②湿度(測定機器固定)③風速・風向(測定機器固定)④照度(測定機器固定)⑤屋上での日射量(測定機器固定)⑥降雨量(測定機器固定)⑦天空率(測定機器移動)⑧反射率(測定機器移動)

2.5 測定位置

図2に示すように、W棟の屋上と中庭の東、西、中央、北、南側測定点に測定機器を固定して気温、湿度および照度を測定した。W・WN・WS棟の渡り廊下の4階、WNとN棟の間の1階と4階で中庭に流入する気流の風速を測定した。W棟と中庭の中央測定点で降雨量を測定した。また、W棟の屋上で日射量を測定した。測定間隔はすべて1分である。また、中庭の南、北、東、西、中央測定点で魚眼カメラを用いて天空率および天空の様子を撮影した。

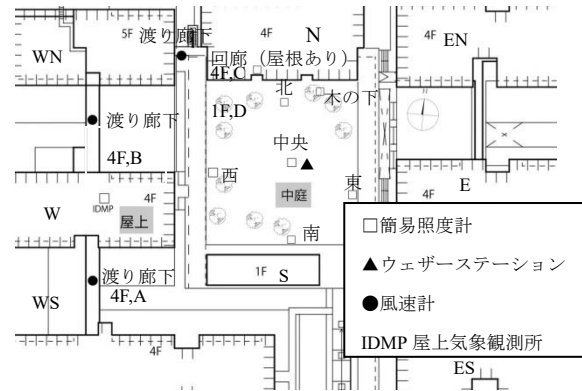


図2 測定装置配置図

2.6 測定結果

測定期間中から、雨天日(7/19)、曇天日(7/20)、晴天日(7/24)を代表日として選び、各測定点の水平面日射量、気温と絶対湿度を図3～8に示す。ただし、曇天日においては12時以降のデータが欠測した。ここで、各測定点の水平面日射量を調べるため、屋上測定点の全天日射量とグローバル照度の回帰関係から発光効率を算出した。その結果、発光効率は雨天時が137.2lx/(W/m²)、曇天時が131.1、晴天時が126.3であった。各測定点に入射する照度を発光効率で割って水平面日射量を算出した。雨天日と曇天日においては、北側測定点の日射量が最も低くなり、他の測定点の照度と日射量はほぼ同じ値であった。また、晴天日においては、北側測定点の照度と日射量が最も高くなった。雨天日と曇天日においては、中庭の各

測定点の気温と絶対湿度は屋上測定点よりも若干高くなった。晴天日においては、中庭の各測定点の気温は屋上測定点より高くなった。また、各測定点の絶対湿度の時刻変動は一致していた。しかし、晴天日の昼間において、各測定点の絶対湿度は中庭外部(屋上測定点)より低くなった。

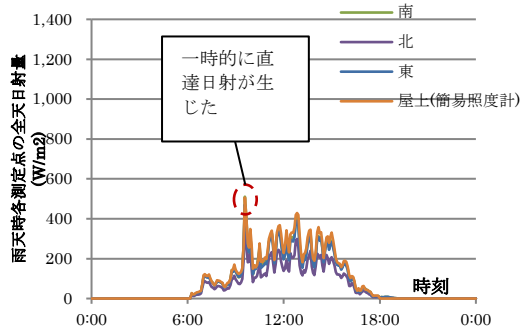


図3 雨天日の水平面日射量

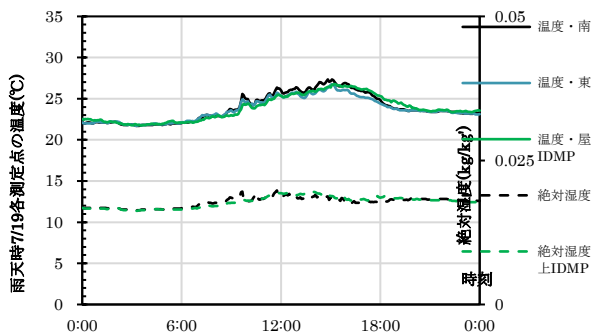


図4 雨天日の気温と絶対湿度

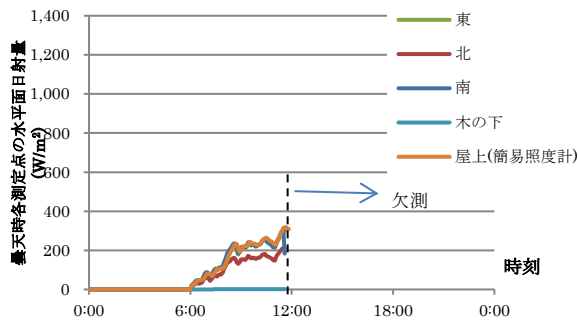


図5 曇天日の水平面日射量

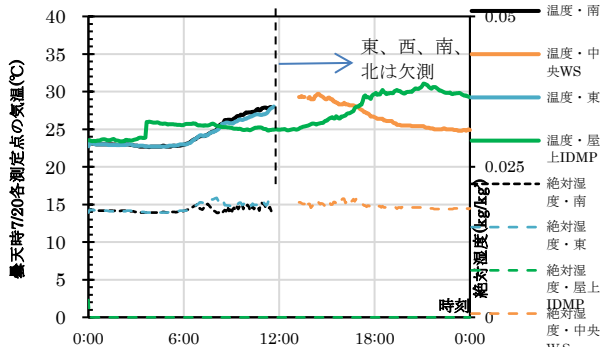


図6 曇天日の気温と絶対湿度

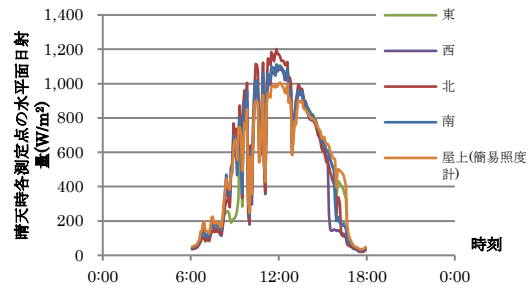


図7 晴天日の水平面日射量

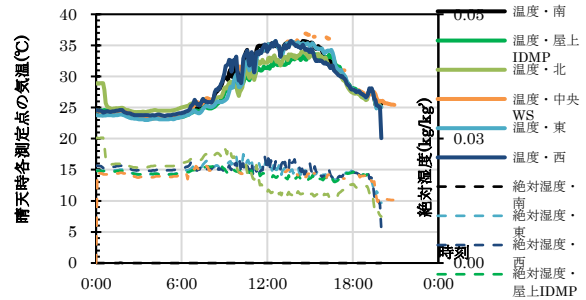


図8 晴天日の気温と絶対湿度

3. 熱と水分の収支定量化

3. 1 計算の目的

直射日光、天空光、通風および地盤および壁体の熱伝導は中庭の温熱環境形成に影響を与える。本節では、そのうち風通しによって運搬される熱量について検討する。

3. 2 計算方法

図9に示すように、風通しによって中庭から排出される顕熱 $Q_{vent,s}$ [W] と潜熱 $Q_{vent,l}$ [W] の和が風通しによって運搬される熱量となる。

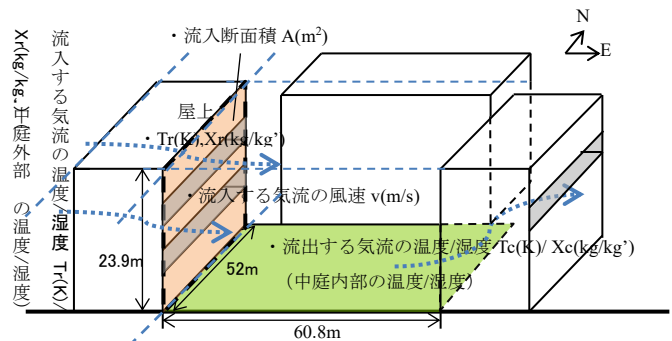


図9 中庭の風通し

中庭に流入する気流の気温と絶対湿度 T_r [K], X_r [kg/kg] は屋上測定点の絶対湿度と同じとした。西側建物の高さと同中庭の幅で求まる西側建物の側面の面積 A [m²] を中庭への気流の流入断面とした。流入気流の風速 v (渡り廊下測定点の風速) と流入する気流の絶対湿度 T_r, X_r 、流出する気流の気温と絶対湿度 T_c [K], X_c [kg/kg] (中庭中央測定点の気温と湿度) の測定値を次式に用いて風通しによって運搬される顕熱量と潜熱量を求めた。

$$Q_{vent,s} = v A \rho C_p (T_r - T_c) \quad (1) \quad Q_{vent,l} = v A \rho L (X_r - X_c) \quad (2)$$

3. 3 計算結果

代表日の晴天、雨天、曇天において、風通しによって運

搬される熱量と顕熱を図 10~12 に示す。雨天日は、直達日射がないので中庭内部と外部の温度差が小さく、風通しによって運搬される熱量が小さい。曇天日においては、日射の影響が少ないが、中庭の内部と外部の温度差が雨天時よりも大きい。そのため、曇天時において風通しによって運搬される熱量も多く、雨天時の 2 倍ほどある。晴天日においては、日射の影響で、日出から日没の時間帯まで風通しによって運搬される熱量がかなり大きい。

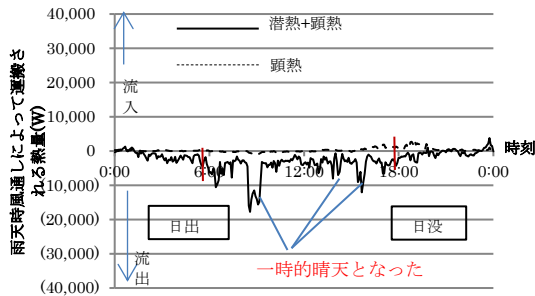


図 10 雨天日において風通しによって運搬される熱量

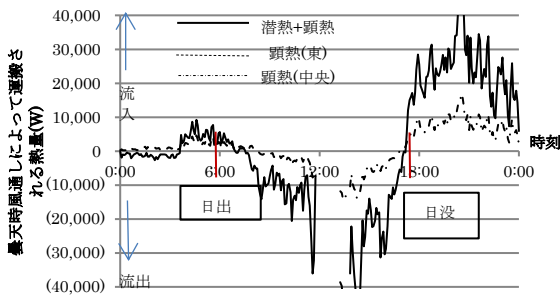


図 11 曇天日において風通しによって運搬される熱量

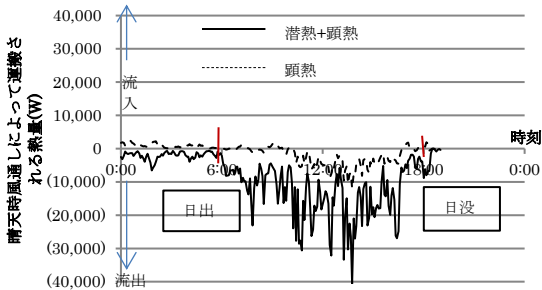


図 12 晴天日において風通しによって運搬される熱量

4. 中庭温熱環境のシミュレーション方法とその検証

4. 1 シミュレーション概要

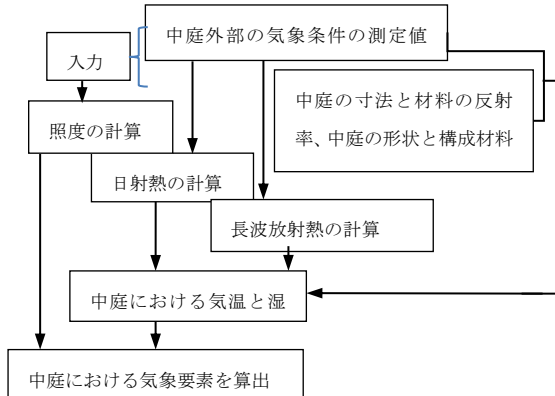


図 13 シミュレーションの流れ

中庭空間の温熱環境のシミュレーションの流れを図 13 に示す。中庭外部(W 棟屋上)の日射量、照度、風速、気温と湿度などの気象要素の測定値および中庭の形状と構成材料を入力値とする。中庭内部に入射する射量、照度、気温、湿度などの気象要素を算出し、表面温度と連立して長波放射熱を算出する。次に、中庭の潜熱と顕熱の収支を満たすように中庭内部の気温と絶対湿度を算出する。

4. 2 計算方法

図 14 に中庭の形状モデルを示す。中庭上空および建物間の隙間からの直射日射や長波放射日射が中庭に入射し、中庭を取り囲む建物の壁面での反射の結果として各部分へ入射する熱量が求められる。モデルにおいては、地盤面、建物壁面および建物間の隙間(仮想面)、天空面を長方形要素に分割し、要素間の相互反射連立方程式^[1]により各要素に入射する日射熱、長波放射熱を式(3)~(7)で求めた。要素表面温度は地盤または壁体内への非定常一次元熱伝導^[2]により式(8)で求めた。これと、中庭空気の顕熱および水蒸気の収支から室温と絶対湿度を求めた。

$$\text{照度} \quad E_j = E_{d,j} + C_{sky} E_{sky} + \sum_i C_{ij} E_{inc,i} \rho_i \quad (3)$$

$$\text{日射熱} \quad J_{inc,j} = J_{d,j} + C_{sky,j} J_{sky} + \sum_i C_{ij} J_{inc,i} \rho_i \quad (4)$$

$$\text{長波放射熱} \quad q_{inc,j} = C_{sky,j} \sigma T_{sky}^4 + \sum_i (1 - \epsilon_i) q_{inc,i} + \epsilon_i \sigma T_i^4 \quad (5)$$

$$\text{中庭の気温} \quad T_{air}^{new} = \{ \rho_{air} C_p T_{air} / \Delta t + v A_v \rho_{air} C_p T_{out} + \sum_i A_i h_c T_{i,j} \} / \{ \rho_{air} C_p V / \Delta t + v A_v \rho_{air} C_p + \sum_i A_i h_c \} \quad (6)$$

$$\text{中庭の絶対湿度} \quad X_{air}^{new} = \{ \rho_{air} V X_{air}^{old} / \Delta t + v A_v \rho_{air} L X_{out} + h' \sum_i A_i \rho_{s,i} \} / \{ \rho_{air} V / \Delta t + v A_v \rho_{air} L + h' \sum_i A_i \rho_{s,i} / 0.622 \} \quad (7)$$

$$\text{要素 j の表面温度} \quad T_{j,k}^{new} = T_{j,k} + \{ \Delta t [k_{j,k-1,k} (T_{j,k-1} - T_{j,k}) / \dots] \} \quad (8)$$

$$\text{温度} \quad \Delta x_{j,k,k+1} + k_{j,k,k+1} (T_{j,k+1} - T_{j,k}) / \Delta x_{j,k,k+1} / \{ (\rho_{j,k} C_{j,k} \Delta x_{j,k-1,k} + \Delta x_{j,k,k+1}) / 2 \}$$

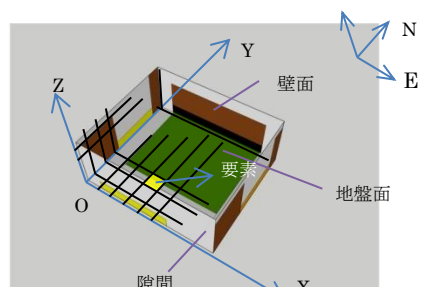


図 14 中庭の形状モデルの近似

4. 3 計算条件

晴天日(7/24)における中庭外部の気象要素および反射率(照度、日射量、温度、湿度、風速)を計算条件として計算を行った。検証計算では、対象となる中庭の長さ、幅と高さ方向を 10x10x5、合計 400 個の要素に分割した。

4. 4 検証結果

中庭の各測定点の日射量、気温と絶対湿度の計算結果を図 15~17 に示す。日射量は、10~14 時の太陽高度が高い時間帯では測定値よりも小さいが、全般的な変

化の傾向は一致している。気温と絶対湿度は変化の傾向を大略再現できた。

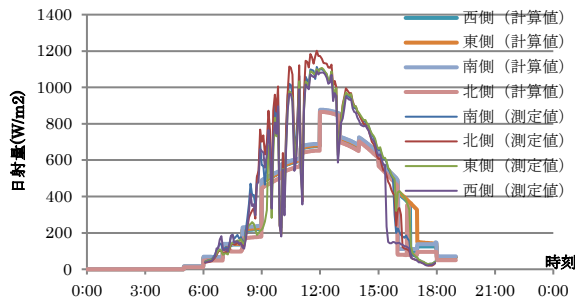


図 15 中庭各測定点の水平面日射量

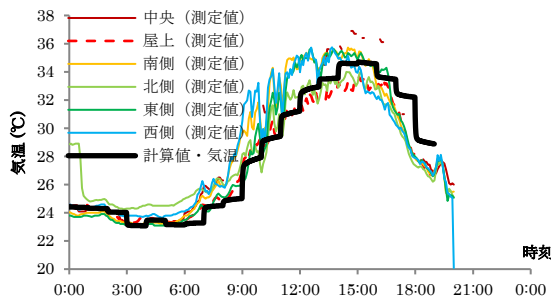


図 17 中庭各測定点の気温

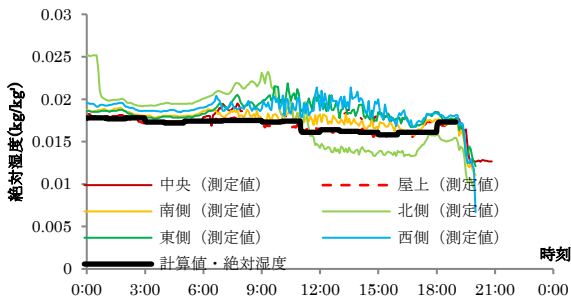


図 16 中庭各測定点の絶対湿度

5. シミュレーションに基づく中庭温熱環境の提案

5.1 検討ケース

表 1 に検討ケースを示す。前節と同じ計算方法で、地盤面の素材を草地とレンガの二通りに設定し、晴天日と雨天日について計算を行った。

表 1 検討ケース

		天気	
		晴天日	雨天日
地盤表面の材料	草地 60% レンガ 40%	ケース 1-1	ケース 2-1
	レンガ 100%	ケース 1-2	ケース 2-2

5.2 計算結果

計算結果から、南側測定点での値を抽出して図 18 に示す。また、中庭内部の気温と絶対湿度の計算結果と中庭外部の気象条件を図 19~20 に示す。晴天日において、中庭の各測定点に入射する日射量、照度と正味長波放射熱流について、ケース 1-1(草地)と 1-2(レンガ)はほぼ同じ結果となった。また、ケース 1-1 の方が地盤の表面温度が低くなった。雨天日のケース 2-1(草地 60%)と 2-2(レンガ 100%)の比較では計算結果はほぼ同じであった。

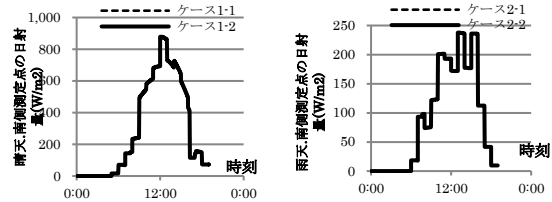


図 18 南側測定点の水平面日射量(左:晴天,右:雨天)

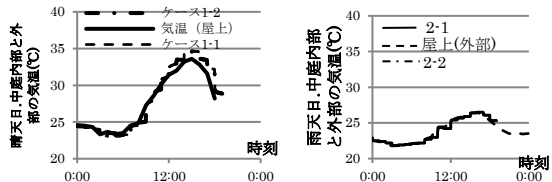


図 19 中庭内部の気温(左:晴天,右:雨天)

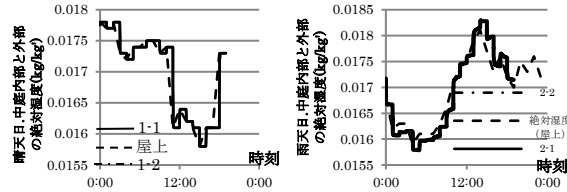


図 20 中庭内部の絶対湿度(左:晴天,右:雨天)

6. 結論

中庭の温熱環境における実測、熱収支の計算および温熱環境シミュレーションを行い、以下の結果を得た。

- ①測定の結果について、雨天日と曇天日において中庭内部の気温は外部より低くなり、晴天日において内部の気温は外部より高くなった。
- ②曇天日において中庭内部と外部の温度差は雨天時より大きいので曇天日において風通しによって運搬される熱量が多く、雨天時の 2 倍ほどある。
- ③温熱環境シミュレーションを行った結果、中庭の温熱環境の傾向を大略は再現できた。
- ④地盤面の素材を草地 0.6 とレンガ 0.4、すべてレンガの 2 種類に設定し、温熱環境シミュレーションを晴天日と雨天日について行った。その結果、晴天日において地盤面をレンガ 100%とすると、各壁面の表面温度が高くなった。

【記号一覧】 ρ : 空気密度[kg/m³], C_p : 空気比熱[J/kgK], L : 水の蒸発熱[kJ/kg], J_{Aj} : 面 j に入射する直達日射量[W/m²], C_{ij} : 面 i の面 j に対する立体角投射率[-], ρ_i : 面 i の反射率[-], $J_{out,i}$: 面 i から出ていく日射熱[W/m²], $J_{inc,i}$: 面 i に入射する日射熱[W/m²], $C_{sky,j}$: 面 j から天空を見た時の立体角投射率(天空率) [-], J_{sky} : 水平面天空日射量[W/m²], T_{out} : 庭の外側の気温, [K], v : 入射する気流の風速 [m/s], V : 中庭の容積[m³], C_p : 中庭空気の比熱[J/kg·K], ρ_{air} : 中庭空気の密度[kg/m³], A_s : 流入面積[m²], h : 水蒸気伝達率 $h = 8.82 \times 10^{-9} (6.1 + 4.2v)$ [kg/m²sPa], $P_{s,j}$: 要素 j 表面における飽和水蒸気圧[Pa], ρ : 材料の密度[kg/m³], c : 材料の比熱[J/(kgK)], $\Delta x_{j,1,2}$: 節点間隔[m], α : 日射吸収率[-], $J_{inc,j}$: 要素 j に入射する日射熱[W/m²], ϵ : 長波放射率[-], $q_{mc,j}$: 要素 j に入射する長波放射熱流[W/m²], σ : ステファン・ボルツマン係数[W/m²K⁴], $T_{j,1}$: 要素 j の表面温度(最初のコントロールボリュームの温度) [°C], h_c : 対流熱伝達率(=6.2+4.2v) [W/(m²K)], T_{air} : 中庭の気温[°C], h' : 水蒸気伝達率[kg/m²sPa], $P_{sat,j}$: 要素 j の表面温度における飽和水蒸気圧[Pa], P_{air} : 中庭空気の飽和水蒸気圧[Pa]

【参考文献】

- [1] 松浦邦男他: 建築環境工学 I 一日照・光・音一, 2001 年 4 月 10 日, 相互反射連立方程式 p93
- [2] スハス V バタンカー著、水谷幸夫、香月正司訳、コンピュータによる熱移動と流れの数値解析, 1980, p57