戸建住宅における冷却塔放射冷房の仕様・運用条件に関する研究

A STUDY ON THE SPEC AND THE OPERATION CONDITION OF THE HOUSING INDOOR CLIMATE CONTROLLING BY THE PANEL COOLING WITH COOLING TOWER

石原衣梨*, 高橋 達**
Eri ISHIHARA and Itaru TAKAHASHI

It is vitally important to develop a space cooling system which realize the both of low exergy consumption and thermal comfort in hot and humid area. So the purpose of this paper is to grasp the relationship between the effect of indoor climate controlling and the spec and the operation condition of the housing panel cooling with cooling tower assisted by passive strategies. Followings were found by a numerical analysis at the the AIJ standard model of wooden house. The spec and the operation in the case that the lowest room air temperature is realized is the combination of the cooling panels position on the floor and the ceiling, thermal storage parts in whole walls, the running time of the panel cooling from 11:00 to 14:00 and from 16:00 to 19:00, ventilation time from 16:00 to 8:00 and so on.

Keywords: Cooling Tower, Radiative Cooling, Passive Cooling

冷却塔, 放射冷却, パッシブクーリング

1. 研究の背景と目的

近年、環境負荷低減の一つの方法としてパッシブクーリングが認識されつつある。特に、2011年は福島第一原子力発電所事故が起こったため、関東、東北圏内を発端として全国的に節電が呼びかけられる事態になった。そのため、冷房用電力の需要が高まる夏期は、エアコンの設定温度を28℃にすることや日射遮蔽装置を設置することが政府から推奨されるなど、冷房用電力使用量を削減し、室温が高温の場合でも快適に過ごすための手法が全国的に見直された。

筆者らは、日射遮蔽や換気、断熱、蓄熱などのパッシブ手法を徹底した上で酷暑時には低エクセルギー利用のアクティブ手法を複合することにより、快適性の確保と環境負荷の低減を両立するようなシステムの研究を以前から行っており²⁾³⁾⁴⁾、その社会的実現を試みている⁵⁾。そのようなシステムの一つに、冷却塔を冷却源とした放射冷房がある。

水を用いた放射冷房は冷却源に冷却塔を用いた放射冷房(以下、冷却塔放射冷房)の他に、屋根流水を利用した天井放射冷房⁶⁾や井水放射冷房・外気予冷兼用システム⁷⁾、二重屋根採冷システムがある³⁾⁴⁾。馬・須永による屋根流水を利用した天井放射冷房の研究⁷⁾では、室内グローブ温度が27℃以下で、室内相対湿度が60%以上の場合でも、6割の被験者が快適と申告することが確認されている。また、深井・岩松・浅田・宿谷らは、室内相対湿度が70%以上の場合でも、室温・周壁

平均温度がともに29℃以下で風速が0.15m/s以上であれば、快適性が得られることを確認している⁸⁾。五十嵐・水澤・高橋らも同様のことを二重屋根採冷システムの被験者実験で確認している³⁾。

冷却塔放射冷房は、冷却塔を通過した水の温度が外気温湿度における湿球温度以上になるため、放射冷却面温度が露点温度より高くなることから、他の放射冷房より結露のリスクを著しく縮小できる。榊原・荒谷・石田は冷却塔放射冷房を提案し、数値シミュレーションにより日射遮蔽や換気の有無に関する検討を行っている⁹⁾。近年では、Vangtook・Chirattananonが数値シミュレーションだけでなく、レンガ造の実験小屋を対象とした実験を行っているが¹⁰⁾、パッシブ手法との複合については検討していない。これらの既往研究では、パッシブ手法と冷却塔放射冷房の複合システム全体の仕様・運用条件と冷房効果・結露の関係に関する詳細な検討、スケールなどによる配管防食を防ぐための実務的な検討が行われていない。そのため、熱的快適性、結露回避を実現するための、冷却塔放射冷房の設備仕様・運用条件、建物熱性能の仕様、運用条件を合わせて把握する必要がある。

以上のことから本研究では、住宅を対象とした冷却塔放射冷房に関する数値シミュレーションを行うことで、設計に必要な仕様・運用条件と冷房効果などとの関係を定量的に把握することを目的とする。

本論文の一部は既発表論文¹⁾を加筆・修正したものである。

* (有)ZO 設計室

(当時 東海大学大学院 大学院生)

** 東海大学工学部 准教授・博士(工学)

ZO Consulting Engineers, M. Eng.

(Ex-Graduate Student, Tokai Univ.)

Assoc. Prof., Faculty of Eng., Tokai Univ., Dr. Eng.

2. 研究方法

2-1 数値シミュレーションの方法

図1に冷却塔放射冷房のシステムを示す。冷却塔放射冷房は、冷却塔における水の蒸発作用により湿球温度近くまで冷却した雨水や上水(以下、冷却水)を、床・天井内の埋設配管に流れる水(以下、冷水)と熱交換することで、床や天井を冷却し、放射冷房を行うシステムである。

計算モデルを定めるために、後述する日本建築学会標準問題モデル¹⁾の木造住宅を対象にして、冷却塔放射冷房の設備設計を行った。冷却塔はメーカーから市販されている最小能力(最大冷却能力2kW、定格電力15W、流量26L/min)のものを選定した。上水使用量が過大にならないようにするため、雨水で上水の一部を代替するようにした。また、放射冷却面は、家具のレイアウトによる影響が小さく、放射冷却面積を大きくとれる床と天井の2面とした。なお、放射冷却面には蓄熱効果により室温・周壁温度の振幅を小さくするために蓄熱部位を設けることが有用と考えている。冷水循環ポンプは流量3L/min、管径20mmの配管圧力損失から揚程を算出し、選定した。その結果、一次側、二次側循環ポンプはともに定格電力50Wのものになった。

熱交換槽は市販の雨水貯留タンクとし、熱交換器(20A)の銅管を直径500mmで18段に巻いたもの^{注7)}が設置できる、市販品における最小容量(W500mm×D500mm×H930mm、200L)とした。一般に蓄熱槽と呼ばれる一次側タンクを熱交換槽と表記したのは、本論文では設置スペースの観点から一

図3 計算対象室のモデル

般に導入しやすい小容量を想定しており、そのことによって蓄熱効率が低く、蓄熱槽と呼ぶのが妥当ではないためである。本システムでは、熱交換槽と雨水貯留タンクが必要になるため、雨水貯留タンクは、北側の敷地境界と外壁との間隔から人の通る幅とタンク2基分のコストを考慮し、寸法がW800mm×D800mm×H1250mm、容量が600Lのものを想定した。また、雨水貯留タンクと熱交換槽、冷却塔は日射の当たらない北側地上に設置すると仮定した。

2-2 数値シミュレーションの条件

図2に計算対象住宅の1F平面、図3、図4に計算対象室のモデル、躯体

図1 冷却塔放射冷房のシステム

図2 計算対象住宅の1F平面

※図中の単位の無い数値は厚さ[mm]。※断熱材はグラスウール24K
※冷水管は架橋ポリエチレン管。

図4 躯体の断面構成

表1 冷却塔放射冷房に関わる計算式

室空気熱収支 ¹²⁾	放射冷却面での冷水による除去熱量 ¹³⁾	放射冷却面内部における配管部分の諸変数 ¹³⁾
$Q_c \frac{d\theta}{dt} + \sum_{j=1}^N S_j \alpha_{ic} (\theta_r - \theta_j) + G_v (\theta_r - \theta_a) = H$ (1)	$q = C_{pw} \gamma_w V_w (\theta_{w1} - \theta_{w0})$ (4)	$\theta_k = (1 - \eta_F^*) \theta_E + \eta_F^* \theta_{kp}$ (7)
壁体内質点kでの熱収支 ¹²⁾	冷水配管出口水温 ¹³⁾	$\ell = (w - d)/2$ (8)
$Q_k \frac{d\theta_k}{dt} + C_k (\theta_k - \theta_{k+1}) + {}_{-1}C_k (\theta_k - \theta_{k-1}) = 0$ (2)	$\theta_{w0} = \{ \theta_k / \eta_F^* + \theta_E (1 - 1/\eta_F^*) \} \cdot A_F E / (C_{pw} \gamma_w V_w)$	$\eta_F^* = (1 - d/w) \eta_F + d/w$ (9)
壁内表面の熱収支 ¹²⁾	$+ \theta_{w1} \{ 1 - A_F E / (C_{pw} \gamma_w V_w) \}$ (5)	$z = ({}_{{-1}}C_k + {}_{+1}C_k) / (d \cdot \lambda)$ (10)
${}_{{-1}}C_{k+1} (\theta_{k+1} - \theta_k) + \alpha_{ic} (\theta_{k+1} - \theta_r)$	$E = C_{pw} \gamma_w V_w [1 - \exp\{K_{FP} L_{FP} / (C_{pw} \gamma_w V_w)\}] / A_F$ (6)	$\eta_F = \tanh(\ell \sqrt{z}) / (\ell \sqrt{z})$ (11)
$+ \alpha_{ir} (\theta_{k+1} - \sum g_{ij} \theta_j) = R_i$ (3)		$\theta_E = ({}_{{-1}}C_k \cdot \theta_{k-1} + {}_{+1}C_k \cdot \theta_{k+1}) / ({}_{{-1}}C_k + {}_{+1}C_k)$ (12)

熱交換槽の熱収支	雨水収集量 ¹⁴⁾	冷却塔の水収支 ^{14), 15)}
$C_{PW} \gamma_W V_{CT} (\theta_{w1} - \theta_{w0}) = C_{PW} \gamma_W V_T \frac{d\theta_{w1}}{dt} + C_{PW} \gamma_W V_W (\theta_{w1} - \theta_{w0}) + K_S (\theta_{w1} - \theta_a)$ (13)	$R_c = k_R r_f A_R$ (14)	$(R_c - R_{OF}) + CW = Q + Q_{OF}$ (15)

A_F : 床面積 [m²], A_R : 屋根面積 [m²], CW : 上水の供給量 [m³/s], ${}_{{-1}}C_k$: 壁体内質点 k 前後の熱コンダクタンス [W/m²C], C_{pw} : 水の比熱 [J/gC], d : 冷水配管外径 [m], E : θ_{w0} を θ_k の一次関数として扱うために必要な係数, g_{ij} : 面 i に対する面 j の放射吸収係数 [-], G_v : 隙間換気量の熱容量 [W/C], H : 内部発熱 [W], K_{FP} : 流熱通過率 [W/m²C], k_R : 集水時の流出係数 [-] (=0.85), K_S : 熱交換槽の熱損失係数 [W/C] (=14.7W/C), L_{FP} : 配管長 [m], N : 壁面数 [-], q : 冷水投入熱量 [W], Q : 冷却塔使用水量 [m³/s] (= $\gamma V(x_s - x_a)/\gamma_a$), Q_c : 壁体内質点 k の熱容量 [J/C], Q_{OF} : 冷却塔からの飛散水量 [m³/s] (= $0.4 \cdot V_{CT}$ ¹⁵⁾), Q_r : 室空気熱収支 [J/C], R_c : 雨水収集量 [m³/s], R_i : 壁内表面に吸収される短波放射量 [W/m²], r_f : 降水量 [m³/s], R_o : 壁外表面に吸収される短波放射量 [W/m²], R_{OF} : 雨水のオーバーフロー量 [m³/s], S_j : 壁 j の面積 [m²], t : 時間 [s], V : 冷却塔内部の風量 [m³/s], V_{CT} : 冷却塔の循環流量 [m³/s], V_T : 熱交換槽有効容量 [m³], V_w : 冷水流量 [m³/s], w : 冷水配管間隔 [m], x_a : 外気絶対湿度 [kg/kg], x_s : 冷却塔から排出された空気の絶対湿度 [kg/kg], α_{ic} : 壁の対流熱伝達率 [W/m²C], α_{ir} : 壁の内表面放射熱伝達率 [W/m²C], α_o : 壁の外表面総合熱伝達率 [W/m²C], η_F^* : 配管径を考慮した冷水配管フィン効率 [-], η_F : 冷水配管のフィン効率 [-], θ_r : 外気温 [C], θ_s : 面 k 周囲の等価温度 [C], θ_j : 面 j の内表面温度 [C], θ_k : 壁体内質点 k の温度 [C], θ_{kp} : 冷水配管表面温度 [C], θ_a : 室空気温度 [C], $\Delta\theta_w$: 冷水の出入口温度差 (= $\theta_{w1} - \theta_{w0}$) [C], θ_{w1} : 冷水行きヘッダー入口水温 [C], θ_{w0} : 冷水還りヘッダー出口水温 [C], θ_{wk} : 冷却塔の出口温度 [C], γ : 空気の密度 [g/m³], γ_w : 水の密度 [g/m³], λ : 冷却部材の熱伝導率 [W/m²C].

体の断面構成を示す。表1に冷却塔放射冷房に関わる計算式を示す。住宅のプランや断面構成、内部発熱・水蒸気発生スケジュールは日本建築学会標準問題モデル¹¹⁾を基準とし、計算対象室は1Fの居間、和室(以下、LD室、CB室)とした。ただし、窓はプログラムの特性上面積を変えず1ヶ所にした。また、躯体の断面構成は次世代省エネ基準IV地域相当の断熱を満たすために、グラスウール24K相当の断熱材を外壁に90mm、床に135mm、天井に90mm施すと仮定した¹²⁾。

表1の式(1)～式(3)は室空気・壁体における熱収支式¹²⁾、式(4)～式(12)は放射冷却面における伝熱の計算式である¹³⁾。また、式(13)は熱交換槽の熱収支式、式(14)、式(15)は雨水集水量¹⁴⁾、冷却塔の水収支¹⁴⁾¹⁵⁾である。なお、壁室内側表面では、各壁間の相互放射を考慮し、Gebhartの放射吸収係数を用いた計算を行った。各壁室内側表面の長波長放射率は0.9とした¹²⁾。

室空気や壁の温度変動の計算には後退差分法を用い、熱容量質点系熱収支式を逆行列要素算出によって解いた¹²⁾。計算時間間隔は3600sとした。冷却塔が日陰に設置されている場合、日射熱取得がないため、周囲外気からの対流による熱取得と冷水から冷却水への除去熱量の和が蒸発による潜熱放出とバランスし、冷却水温度が湿球温度程度にまで下げられると考える。そのため、熱交換槽へ送られる冷却水の温度には外気温湿度における湿球温度を与えることにした。また、放射冷却面内の熱伝導は冷水管のある面で一様に吸熱があると仮定した¹³⁾。隣室の室空気温度は計算対象室における前時刻の室空気温度とした。

外気温湿度や日射量、降水量の入力データには拡張アメダス気象データ標準年(東京 大手町)のものを用い、冷房期間は外気温が30℃以上になる7月20日から9月10日とした。また、パッシブ手法のみ(以下、パッシブ単独)の場合は、換気を終日10回/h(以下、換気24h)行い、熱交換パネルを設置しないこと以外は建築仕様が後述する表3の仕様・運用条件と同様の室内熱環境と比較できるようにした。

後述するSET*の計算では^{注4)}、代謝量を67.6W/m²(1.17met)、仕事量を0W/m²、着衣量を0.6cloとした。なお、着衣量は長袖シャツを常

表2 数値シミュレーションの条件

パラメータ項目	条件
① 放射冷却面の位置	床・天井、床、天井、無
② 蓄熱部位(位置、厚さ・材質)	位置：全面、床・天井・間仕切壁、床・天井、天井、床 厚さ・材質：石膏プラスター25mm、水30mm
③ 放射冷房と冷却塔の運転時間	放射冷房：10-20時、12-18時、8-10時+11-19時、8-13時+14-19時、11-14時+16-19時、12-15時+16-19時、20-6時 冷却塔：放射冷房と同時に運転、20-8時
④ 換気時間・換気回数	換気時間：0時、16-8時、17-8時、18-8時、20-8時、24h 換気回数：0.5回/h、1回/h、1.5回/h、2.0回/h、10回/h
⑤ 冷水配管の呼び径・間隔	呼び径：20A、15A、13A、10A、8A、5A 間隔：200mm、150mm、130mm、100mm、80mm、50mm
⑥ 計算対象室の方位	南、東、西
⑦ 雨水貯留タンク	1250L、600L、500L
⑧ 冷水流量	3L/min、13L/min
⑨ 日射遮蔽(簾)	有り、無し
⑩ 室内風速	0.1、0.3m/s、0.3m/s、24h、0.3m/s、0.7m/s

※換気時は換気回数10回/h、それ以外は換気回数0.5回/h。
※風速は窓閉切時で0.1m/s、自然通風で0.3m/s、扇風機運転で0.7m/s。
※□内の文字はシステムの仕様に関係なく固定した条件。

表3 実現性及び汎用性・コストを考慮した条件において室空気温度が最低になった各仕様・運用条件(計算結果)

パラメータ項目	ハイスベック	実用6h	実用10h
放射冷却面の位置	床・天井	床	
蓄熱部位 (位置、厚さ、材質)	壁面・天井: 石膏プラスター 25mm 床:水蓄熱30mm	壁面・床・天井: 石膏プラスター 25mm	
換気時間	16-8時		
換気回数	20-8時:10回/h、8-16時:0.5回/h 16-18時:2回/h		
冷却塔放射冷房の運転時間	11-14+16-19時	12-18時	8-10+11-19時

※特に記載が無いものは表1の条件と同じ。

※特に記載が無いものは表1の条件と同じ。

時着る人もいることから安全側を考慮して設定した。

2-3 数値シミュレーションのパラメータ

表2に数値シミュレーションの条件を示す。数値シミュレーションで用いたパラメータはパッシブ手法の中で比較的認知度の高いと思われる日射遮蔽や換気、蓄熱(冷)の3項目と運用条件に関わる放射冷却面の位置、放射冷房や冷却塔の運転時間、冷水流量、冷水配管の呼び径・間隔の5項目、その他に計算対象室の方位などを含む合計10項目であり、これら全てのパターンについて検討を行った。

換気回数は、窓を全開した場合で10回/h、窓を完全に閉めた場合で0.5回/hとしたが、後述する結露回避のための換気の検討では、窓を少し開

図5 ハイスpekの仕様・運用条件におけるLD室・CB室の室空気温度・周壁平均温度・相対湿度

図6 放射冷却面位置と温度帯別時間割合との関係

図7 蓄熱部位の位置と温度帯別時間割合との関係

図8 床蓄熱部位の厚さ・材質と温度帯別時間割合との関係

図9 放射冷房運転時間と室空気温度の温度帯別時間割合との関係

図10 冷却塔の運転時間と冷水行きヘッダー入口水温の変化

けた場合を想定して1.5回/h、または2回/hの換気回数を与えた。なお、結露発生条件として、放射冷却面近傍が常時無風になっていると仮定し、その温度が露点温度(室中央の絶対湿度から算出)以下になった場合とした。放射冷房の運転時間は蓄熱効果による影響と夜間運転時における結露発生のリスクを抑制するため、不在時も在室時に備えた予冷運転を考慮して設定した。そのため、室内熱環境の評価は在室時だけでなく不在時も含めて行った。

結露を考慮し、内部発熱は日本建築学会標準問題モデルの提案時より電化製品の定格消費電力が小さくなっており、夏期は日の出が早い、現時点で一般的な機種と考えられるものを使用し、朝は照明を利用しないと仮定して与えた(照明78%減、機器40%減)。日射遮蔽には室外日除けとして簾を想定し、スラット角を90°、スラット間隔を30mm、スラット幅を2mm、日射反射率を0.1と仮定した。

冷水管の呼び径は、外径寸法が石膏プラスター2枚の厚さを超えないことから20A以下に、間隔は曲げ部分の配管断面が歪まないようにするために呼び径寸法の10倍で一般に施工されることから設定した。

3. 結果・考察

表3に実現性及び汎用性・コストを考慮した条件において室空気温度が最低になった各仕様・運用条件を示す。本論文では、室空気温度が30°C未満になることを目指しているが、利用者により許容範囲が異なるため、30°C未満になる時間割合が9割以上の「ハイスぺック」、8割以上の「実用10h」、7割以上の「実用6h」という仕様を設けた。なお、ハイスぺックは施工性を考慮して放射冷却面を2面とし、実用は汎用性を考慮して放射冷却面を1面とした。

パラメータ項目とその条件の数が多いため、以下の結果・考察では、数値シミュレーションにより試行錯誤して求めた最低室空気温度の条件の結果(表3の条件)を使い、1つのパラメータ条件のみを変えて説明する。

図5に冷房能力が最も高いハイスぺックの仕様・運用条件におけるLD室、CB室の室空気温度・周壁平均温度などの経時変化を示す。室空気温度の期間最高値はLD室で7月25日16時に31.2°C、CB室で7月24日22時に29.5°Cになった。また、周壁平均温度の期間最高値はLD室で7月31日21時に30.4°C、CB室で7月25日15時に29.3°Cになった。

3-1 仕様・運用条件と冷房効果の関係

図11 換気時間帯と室空気温度の温度帯別時間割合との関係(2回/h)

図12 換気回数と結露発生時間の関係

3-1-1 放射冷却面の位置と冷房効果の関係

図6に実用6hにおける放射冷却面位置と温度帯別時間割合との関係を示す。室空気が28℃以上になる時間割合は、放射冷却面を床・天井にした場合で50%、床のみで61%、天井のみで63%となり、同程度だった。周壁平均温度も室気温とほぼ同様の結果になった。

また、放射冷却面の面積を大きくした場合、漏水の可能性やコストの増加などが考えられる。そのため、前述表3のように、実用は放射

図13 冷水配管の呼び径と温度帯別時間割合との関係

図14 室方位・放射冷房運転時間と温度帯別時間割合との関係

図15 室空気の温度帯別時間割合のバツパ単独との比較

図16 周壁平均温度の温度帯別時間割合のバツパ単独との比較

冷却面を床のみに設け、ハイスベックは放射冷却面を床・天井に設けることが妥当と判断した。

3-1-2 蓄熱部位の位置・材質・厚さと冷房効果

図7に実用6hにおける蓄熱部位の位置と温度帯別時間割合との関係、図8にハイスベックにおける床蓄熱部位の厚さ・材質と温度帯別時間割合との関係を示す。室気温、周壁平均温度が28℃以上になる時間割合は、蓄熱部位の位置に関係なく約60%である。しかしながら、30℃以上になる時間割合は、室気温、周壁平均温度ともに蓄熱部位が周壁全面の場合で22%と最も小さく、床のみに蓄熱部位を設けた場合が29%で最も大きい。実用では、冷媒温度が比較的高くなるため、蓄冷効果が減少し、蓄熱部位の材質と厚さを石膏プラスター25mmと水30mm(保冷剤用の厚さ30mmのプラスチック容器に水を注入したもの。以下、水カプセル)にした場合と差異があまり見られなかった。蓄冷(熱)効果の高いハイスベックでは、放射冷房の運転時間数により蓄冷効果が大きくなるため、蓄熱部位を水カプセル30mmとし、実用は安価で施工性の高い石膏プラスター25mmが妥当と考える。

3-1-3 放射冷房・冷却塔の運転時間と冷房効果の関係

図9に放射冷房運転時間と室空気の温度帯別時間割合の関係、図10にハイスベックにおける冷却塔の運転時間と冷水行きヘッダー入口水温の変化を示す。放射冷房の運転時間が最も短く、室空気を低く抑えることができたのは、実用6hで12-18時、実用10hで8-10時及び11-19時(以下、8-10時+11-19時)、ハイスベックで11-14時+16-19時となった。室空気が28℃以上になる時間割合は、実用6hの場合、12-15時+16-19時運転のように放射冷房の運転を2回に分けることによって9ポイント大きくなる。実用10hとハイスベックの場合、放射冷房の運転時間を2回に分けることにより、室空気が30℃以上になる時間割合は1ポイント小さくなる。

当日20時～翌日6時(以下、20-6時)の運転では、28℃以下になる室気温・周壁平均温度の時間割合は他の運転時間帯より大きくなっているが、これは夜間であり、日中は逆に仕様に関係なく30℃以上になる時間割合は他の運転時間帯の場合より、3ポイント以上大きくなる。

冷却塔と放射冷房の運転時間を同時刻にした場合(表3の条件)と、冷却塔を夜間に運転した場合と比べると、冷水行きヘッダー入口水温差は8月1日18時に最も差が大きくなり、冷却塔と放射冷房を同時刻に運転した場合の方が8.3℃低くなった。このことから、冷却塔と放射冷房の同時運転が妥当と考える。

3-1-4 結露回避のための換気条件

図11にハイスベックを対象とした換気時間帯と室空気の温度帯別時間割合の関係、図12に16-18時の換気における換気回数と結露発生時間の関係を示す。周壁平均温度の温度帯別時間割合は図11と同様になった。室空気が28℃以上になる時間割合は、20-8時の換気が54%で最も大きくできるが、7/23～8/1以外は概ね17時前後に結露が発生した。そこで、換気回数は16-18時に実用で1.5回/h、ハイスベックで2.0回/h、18-8時の換気は全て10回/hとすれば、結露の発生を回避し、20-8時に換気した場合と室空気の変動が同様になる。

3-1-5 冷水配管の径・間隔と冷房効果の関係

図13に実用6hを対象とした冷水配管の呼び径と温度帯別時間割合との関係を示す。呼び径5Aの場合、28℃以上の時間割合は、室気温で64%、周壁平均温度で67%である。これは20Aの場合よりそれぞれ3ポイント、5ポイント大きい。また、呼び径と配管間隔で比較した場

図17 雨水貯留タンクの容量と使用水量・上水代替率の関係

合、呼び径が小さくなるほど、温度が低い場合の時間割合が小さくなっている。配管間隔を小さくする場合、配管長が大きくなり、その圧力損失が大きくなるため、ポンプの使用電力が大きくなる。これらのことから、冷水配管は、施工が容易な、呼び径が20A、間隔が200mmのもの（以下、20A・200mm）が望ましいと考える。

3-1-6 室方位と冷房効果の関係

図14に計算対象室方位・放射冷房運転時間と温度帯別時間割合との関係を示す。南に面する室では、実用6hが12-18時、実用10hが8-10時+11-19時、ハイスぺックが11-14時+16-19時、東に面する室では実用6hが8-14時、実用10hが8-15時+16-19時、ハイスぺックが8-10時+14-18時の場合に室空気温が最低に抑えられた。西に面する室では実用6hが14-20時、実用10hが8-14時+16-20時、ハイスぺックが12-14時+16-20時の場合に、室空気温が最低になった。このことから、南に面する室では12-14時+16-18時、東に面する室では8-10時、西に面する室では16-20時に冷却塔放射冷房を連続運転し、外気温の高い時間だけでなく日射の影響が生じる前から室内を冷却することが冷房には効果的である。

3-2 パッシブクーリングの補完効果と水使用量

3-2-1 パッシブクーリングの補完効果

図15、図16に室空気温・周壁平均温度の温度帯別時間割合におけるパッシブ単独との比較を示す。CB室で室空気温、周壁平均温度が28℃以上になる時間割合は、それぞれパッシブ単独で60%、64%、実用6hで39%、37%、実用10hで31%、25%、ハイスぺックで19%、16%である。内部発熱が大きく、部屋が広いLD室では、室空気温、周壁平均温度が28℃以上になる時間割合はパッシブ単独でそれぞれ69%、71%、実用6hで61%、62%、実用10hで55%、55%、ハイスぺックで47%、41%となった。冷却塔放射冷房を導入することにより、CB室では室空気温や周壁平均温度が28℃以上になる時間割合を21～48ポイント、LD室では温度が28℃以上になる時間割合を7～30ポイント減らすことができる。

3-2-1 水使用量・上水代替率

図17に雨水貯留タンクの容量と使用水量・上水代替率の関係を示す。上水代替率（雨水使用率）は、実用6hの場合、雨水貯留タンクの容量1250Lで37%、600Lで29%、500Lで27%になった。実用10hの場合、上水代替率は雨水貯留タンクの容量に関わらず19%である。ハイスぺックでは、上水代替率が雨水貯留タンクの容量1250Lで39%、600Lで31%、500Lで29%である。冷却塔放射冷房では、蒸発などにより冷却塔から外部へ排出される水量の値が使用水量となる。そのため、放射冷房の運転時間数と運転時間帯によって上水代替率に差が生じたと考える。また、使用水量の大きい実用10h以外は、雨水貯留タンクの容量が大きくなるほど上水代替率が低くなる。実用10hでは、使用

水量自体が大きいために貯留した雨水が速やかに使いきられ、上水が大量に補給されることにより、雨水貯留タンクの容量が異なっても雨水使用量に差が生じなくなっていると考える。

4. 結論

簾による室外日除けと次世代省エネルギー基準相当の断熱を施した東京の戸建住宅を対象に、冷却塔放射冷房の仕様・運転方法に関する

数値シミュレーションを行った結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 放射冷却面を床と天井に設置すると、床や天井のみ設置の場合より室空気温や周壁平均温度が28℃以上になる時間割合が11ポイント以上減少し、61%になる。壁に配管を埋設すると家具のレイアウトが問題になるため、放射冷却面は床と天井、または床のみに導入することが望ましい。
- 2) 蓄熱部材が石膏プラスター25mmと水入りカプセル30mmの場合では、熱容量に差があるにもかかわらず、それらを床に導入して比較した結果、室空気温・周壁平均温度にほとんど温度差が見られない。蓄熱部位を周壁全面にした場合、室空気温が30℃以上になる時間割合は、25%に抑えることができる。
- 3) 冷房期間（7月20日～9月10日）放射冷却面1面の場合では16:00～18:00の換気回数を1.5回/hとし、放射冷却面2面の場合では2.0回/hとし、当日18:00～翌日8:00に10回/hで換気すると、放射冷房時の壁面結露を回避できる。
- 4) 南に面する室では12:00～14:00及び16:00～18:00、東に面する室では8:00～10:00、西に面する室では16:00～20:00に冷却塔放射冷房運転することで、室方位や運転時間数、仕様に関わらず室空気温のピークを低く抑えることができる。
- 5) CB室で室空気温、周壁平均温度が28℃以上になる時間割合は冷却塔放射冷房を導入することで、パッシブ手法のみより21～48ポイント減り、16～39%になる。また、LD室で室空気温、周壁平均温度が30℃以上になる時間割合は、冷却塔放射冷房を導入することで、パッシブ手法のみより7～30ポイント減り、41～62%になる。

本研究では、東京における冷却塔放射冷房の仕様・運転方法などを明らかにしたが、今後は地域別に本システムの冷房効果を検討する必要があると考える。

謝辞

本研究における冷却塔放射冷房の設計では、(有)ZO設計室の伊藤教子さん・布施安隆さんに貴重なご協力をいただきました。また、数値シミュレーションでは、当時東海大学大学院生の辻康昭さんに貴重なご協力を賜りました。ここに記して謝意を表します。

なお、本研究は平成22年度文部科学省科学研究補助金（基盤研究(B)、課題：「人—自然共生建築」系のエクセルギー消費最適化に関する研究、研究代表者：宿谷昌則、研究分担者：斉藤雅也・高橋達）の補助により実現しました。

注

注1) 図A.1のように放射冷暖房の冷却源に冷却塔を用いることで夏期は放射

図A.1 冷却塔放射冷房及び放射暖房のシステム

図A.2 部屋数別における室空気温度の温度帯別時間割合

図A.3 部屋数別における周壁平均温度の温度帯別時間割合

図A.4 日除けの有無と室空気温度の温度帯別時間割合との関係

図A.5 室内風速別のSET*との温度帯別時間割合

冷房を行い、冬期は太陽集熱器と給湯器を加熱源に用いることで同一の冷水配管を利用して放射暖房を行うことができる⁹⁾。

注2) 放射冷房時における結露回避のために温度制御の機構を導入すると、そのイニシャルコストがエアコン費用以上に相当し、普及性が低くなるため、イニシャルコストが数万円で済む漏水センサーにより冷水配管（金属バルブなど）で結露を検知し、そのアラーム表示やブザー音をもとに手動でバルブを閉じる方法が有効と考えている。

注3) 1.3で述べた以外に、実用6hを対象にLD室の部屋数を1室～9室まで

増やした場合のシミュレーションを行った結果、図A.2のように水温は部屋数と比例して上昇していた。しかしながら、図A.3、図A.4のように室空気温度と周壁平均温度が30℃以上になる時間割合は、それぞれ2%、4%に留まる。このように市販の最小能力の冷却塔を用いた場合、最大8部屋の冷房が可能となるので、戸建住宅には過大能力である。図A.5のように日射遮蔽の有無によって室空気温度が30℃以上になる時間割合の差は22ポイント前後に留まる。図A.6のように扇風機や天井扇などを用いて室内風速を0.7m/sにした場合は、自然換気を行った場合よりSET*が30℃以上になる時間割合は33%小さくなる。

注4) 北川・田辺らは、放射冷房を行っている人工気候室で同一のSET*であっても、無風時と風速0.1～0.3m/sとは温冷感申告がそのスケールで±1ポイントの誤差が生じることを確認している¹⁸⁾。この点をふまえ、本研究では室内熱環境の快適性をSET*などで評価はせずに、熱環境要素の集約的物理量として示すに留めた。

注5) 冷房機関全体ではなく、在室時のみに着目すると、室空気温度が28℃以上になる時間割合は、LD室の場合、ハイスベックで34%、実用6hで45%、実用10hで40%、CB室の場合、ハイスベックで13%、実用6hで22%、実用10hで19%である。また、28℃以上になる周壁平均温度の時間割合は、LD室の場合、ハイスベックで25%、実用6hで41%、実用10hで36%、CB室の場合、ハイスベックで10%、実用6hで22%、実用10hで19%だった。

注6) 冷却塔メーカーは、自動薬剤注入装置をコスト・スペースの問題から導入できない場合のために、薬剤ホルダーをオプションとして販売している。また、一回冷却塔内に吊るすことにより、3ヶ月殺菌能力をもつ塩素系抗レジオネラ薬剤が複数市販されている¹⁹⁾。これらのことから住宅においてローコストでの衛生管理は可能と考える。

注7) 熱交換槽における冷却水の出入口温度差を2.5℃とした場合、その除去熱量は4550Wになる。熱交換器の流速が1.5m/sであることから、熱交換器の管内強制対流熱伝達率は4710W/(m²・K)²⁰⁾、管外の水中の自然対流時における対流熱伝達率の上限が580W/(m²・K)²¹⁾、銅管の熱伝導率は515W/(m²・K)となる。そのため、4550Wの交換熱量を有する熱交換器には3.58m²以上の表面積が必要になることから、3.58m²強の伝熱面積をもつ20A銅管を直径500mmで18段巻いた熱交換器とした。温度効率1.0に相当する最大熱交換量を与えるような熱交換器を想定したため、式13)右辺には温度効率の記号を乗じていない。

参考文献

- 1) 石原衣梨・高橋達：戸建住宅における冷却塔放射冷房によるパッシブ手法の補完に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，D-2，pp.555-556，2012
- 2) 高橋達・辻康昭・伊藤教子：井水放射冷却・外気予冷兼用システムの開発と室内熱環境調整に関する実測調査，日本建築学会環境系論文集，第76巻，第670号，pp.1043-1050，2011-12
- 3) 五十嵐賢征・水澤崇則・高橋達・黒岩哲彦：室内気流を促進させた二重屋根採冷システムにおける快適性の研究 その2. 温冷感・快適感の申告と室内熱環境，日本建築学会大会学術講演梗概集，D-2，pp.557-558，2007-8
- 4) 高橋達・黒岩哲彦：雨水の蒸発を利用した二重屋根採冷システムの開発と室内熱環境の実測，日本建築学会環境系論文集，第573巻，pp.55-61，2003-11
- 5) 高橋達・伊藤教子：雨水放射冷房システムの取り組み—冷却塔利用放射冷房によるパッシブ手法の補完，日本建築学会 環境工学委員会 熱環境運営委員会 第41回熱シンポジウム，pp.57-62，2011.10
- 6) 馬景輝・須永修通：屋根流水を用いた天井放射冷房の熱性能に関する実験研究 屋根流水冷房システムに関する研究その1，日本建築学会環境系論文集，第596号，pp.29-35，2005
- 7) 馬景輝・須永修通：屋根流水放射冷房システムに関する研究 その4. システムの有効性と被験者による快適性の評価，日本建築学会大会学術講演梗概集，D-2，pp.653-654，2005-9
- 8) 深井友樹・三戸部元洋・井澤健輔・浅田秀男・岩松俊哉・福田秀朗・大熊武・宿谷昌則：高温放射冷房と低温放射暖房における快適性に関する実験研究 その2，日本建築学会大会学術講演梗概集，D-2，pp.583-584，2007-8
- 9) 榊原秀幸・荒谷登・石田秀樹：冷却塔の直接利用による天井パネル式冷房の可能性の検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，D-2，pp.931-932，1985
- 10) P. Vangtook and S. Chirattananon: Application of Radiant Cooling as A

Passive Cooling in Hot and Humid Climate, Building and Environment, No. 42, pp.543-556, 2007

- 11) 宇田川光弘:標準問題の提案, 日本建築学会環境工学委員会, 熱分科会第15回熱シンポジウム, pp.23-33, 1985
- 12) 宿谷昌則:数値解析で学ぶ光と熱の建築環境学, 丸善, pp.94-99, pp.161-207, 1993
- 13) 平田勝彦・宿谷昌則:蓄熱式床暖房システムの数値解析一床の蓄熱性, 建物断熱性, 室内熱環境、温水投入熱量の関係に関するケーススタディ, 日本建築学会計画論文報告集, 第419号, pp.39-46, 1991.1
- 14) (財) 空気調和・衛生工学会:雨水利用システム設計と実務, 丸善(株), pp.50-55, 1997
- 15) 高砂熱学工業(株)総合研究所:ビル用マルチ冷媒サブクールシステムの排熱量と運転経費のモデル計算, 大阪府環境情報センター, pp.2-4, 2006
- 16) 国土技術政策総合研究所・建築研究所 監修:自立循環型住宅への設計ガイドライン, (財)建築環境・省エネルギー機構, pp.39-46, 2006
- 17) 柿沼整三:建築断熱の考え方, オーム社, pp.149-154, 2004
- 18) 北川晃一・早野ひろ子・斎藤俊彦・菰田紀子・田辺新一:放射冷房時における気流と温度の体感への影響, 人間と生活 環境, 4 (1), pp.42-51, 1996
- 19) <http://www.legikyo.gr.jp/index.html> : (抗レジオネラ用空調水処理剤協議会 Web サイト), 2012.9.29
- 20) http://engineering-web.com/heat_ja/pipeDittus : (円管内強制対流・熱伝達率・Dittus-Boelterの式 Web サイト), 2012.9.29
- 21) <http://www.solmind.com/sofuto/dennnetu/enntou.htm> : (伝達計算 Web サイト), 2012.9.29

(2012年6月2日原稿受理, 2012年10月26日採用決定)