建築物総合シミュレーションツールを用いた 天井放射冷房システムの設計法の検討

－夏期・中間期の運用を考慮したシステム選定法の提案－

DESIGN METHOD OF RADIANT CEILING COOLING SYSTEM BY USING INTEGRATED ENERGY MODELING TOOL FOR BUILDING SIMULATION

－ Proposal of system planning based on operation in summer and moderate seasons －

松本若菜*, 森 太郎**, 羽山広文***, 菊田弘輝****

*Wakana MATSUMOTO, Taro MORI, Hirofumi HAYAMA
and Koki KIKUTA*

Designing radiant ceiling cooling system is complex because radiant ceiling panels are used with other equipment for dehumidification, ventilation and cooling. The objective of this study was to propose the design method of radiant ceiling cooling system based on operation by using building simulation. The design value of radiant ceiling panels and air-conditioning can be decided easily by using simulation results. The results show that the optimal design and operation of radiant ceiling cooling system depend on first priority of building owners and designers such as thermal comfort and prevention of dew condensation.

Keywords : Radiant ceiling cooling system, Numerical model, Unsteady analysis, Design, Operation, Thermal comfort

天井放射冷房システム, 数値モデル, 非定常解析, 設計法, 運用方法, 快適性

1. はじめに

天井放射冷房システムは、天井を直接冷却し、あるいは天井に冷却した金属パネルなどを取り付けて、人体との放射熱交換を行い、快適感を保つようにしたシステムである¹⁾。人体の放熱量は放射の方が対流よりも多いこと²⁾から、天井からの放射熱伝達による効率的な冷却が見込まれる。天井放射冷房システムは1930年代から開発が進み³⁾、近年日本でも導入事例が増加している⁴⁾。天井放射冷房の長所として、快適性と省エネルギー性の両立が可能であることが挙げられる。天井放射冷房が空気冷房よりも高い室温で同様の快適感を得られることは伊藤らの研究により報告されている⁵⁾。久保らは天井放射空調の快適性に関する検証を行っている⁶⁾。さらに、三村らは天井放射パネルの熱搬送媒体に水を用いた場合、対流式冷房に比べ熱搬送効率が高いと示しており⁷⁾、水式天井放射空調システムは省エネルギーに寄与できる可能性がある。

一方、天井放射冷房システムは顕熱処理を対象としている為、外調機や補助空調機と併用されることが前提であり、天井放射冷房システムを

夏期・中間期にそれぞれ天井放射冷房と他システムをどのように連携すべきかについて研究を進める必要がある。ASHRAE Handbook⁸⁾及びEN15377⁹⁾の設計方法では最大負荷において計算がなされており、夏期・中間期における運用方法は設計時に考慮されていない。運用方法に関しては、鬼頭らがMRT制御下における天井放射パネル、外調機と調湿機を併用した場合の各機器の供給熱量特性について検討を行っている¹⁰⁾。久木田らは年間熱負荷計算による放射パネルと補助空調機の処理熱量の比率に関する検討を行っている¹¹⁾。迫らはオフィスにおける放射パネルの設計と放射パネルと空調機との運用方法について報告している¹²⁾。放射パネルの設計に関しては、岡本ら¹³⁾や塩谷ら¹⁴⁾は天井放射パネルの性能を予測する計算方法を導出している。

日本は欧米に比べ夏季は高温高湿であり¹⁵⁾、放射面を低温にすると結露発生の危険性があることから、結露対策は必要不可欠である。しかし、結露を防ぎながら年間を通して快適性を満足できる放射冷房の運用方法に関する知見は少ない。

* (株大林組 修士(工学)

** 北海道大学大学院工学研究院 准教授・博士(工学)

*** 北海道大学大学院工学研究院 教授・博士(工学)

**** 北海道大学大学院工学研究院 助教・博士(工学)

Obayashi Corporation, M. Eng.

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

Prof., Faculty of Eng., Hokkaido Univ., Dr. Eng.

Assist. Prof., Faculty of Eng., Hokkaido Univ., Dr. Eng.

そこで本研究は、夏期・中間期の運用方法を考慮し、建築物総合シミュレーションツールを用いた天井放射冷房システムの設計手法について提案することを目的とする。

2. 天井放射冷房の設計方法

ASHRAE Handbook⁹⁾では水式放射冷房パネルと他のシステムを組合せた場合の設計手順について以下のように記述されている。図1は手順をフローチャートに直したものである。放射パネルの設計に関しては空調調和・衛生工学便覧¹⁾にも同様の式及び図が掲載されている。

- ① 室内乾球温度、相対湿度、露点温度の決定
- ② 室内顕熱負荷、潜熱負荷の計算
- ③ 必要換気量の算定
- ④ 給気による潜熱冷房能力の計算
- ⑤ 給気による顕熱冷房能力の計算
- ⑥ 室内顕熱負荷から給気による分を引き、残りの顕熱負荷を放射パネルの冷房負荷と決定
- ⑦ 許容可能な最低パネル表面温度の決定
但し、①で決定した露点温度を考慮する。
- ⑧ 非パネル面温度の決定
- ⑨ 放射パネル冷房負荷より必要パネル面積の決定
- ⑩ 平均パネル水温の決定

図1 ASHRAE Handbookによる設計手順

この手順で設計を進めるには、先に空調システム及び風量について、ある程度決定する必要がある。室内顕熱負荷から空調システムで負担する顕熱負荷を除いた残りの顕熱を放射パネルですべて除去できない場合は、空調システムを見直し、風量等の再検討を行う。ループ(④～⑨)による検討を行うことから、容易にシステム概要を決定することは難しい。また、ピーク負荷に対して設計が行われているため中間期の運用方法については考慮されていない。中間期は顕熱比が夏期と異なる可能性があり、顕熱のみを処理する放射パネルの運用方法も変わることから、中間期の運用を踏まえた検討が必要となる。

3. シミュレーションを用いた設計方法

3.1 シミュレーション概要

シミュレーションを用いた設計フローとして図2の手順を提案する。はじめに使用する空調機器の候補と室内顕熱負荷におけるパネル負荷の割合、パネル表面温度、パネル面積、運用方法を考え幾つかのシミュレーションパターンを決定する。シミュレーション後、快適性、結露危険性、室内温熱環境、負荷変動、顕熱除去後空調顕熱比(SHF_{AC})、月別積算負荷の結果から、夏期・中間期の運用方法を決定する。

運用方法の決定においては、クライアントや設計者の意図等によって選択すべき方法は変化する。運用方法決定により各月のパネル表面温度、パネル供給水温、必要パネル面積や空調システム及び空調機器による給気風量を決める。ループによる検討が不要になり一度に複数の因子を検討できる。シミュレーションより多様なデータが出力されるため、設計者は結果から快適性や結露危険性、負荷等を考慮しながら最も条件にあった設計案を判断し、クライアント側へシステム内容及び運用方法について提案する必要がある。

図2 シミュレーションによる設計手順

(1) 対象建物

中間階に位置する小規模事務所を対象として計算を行った。対象地域は東京である。建物モデル条件を表1に、平日の内部発熱スケジュールを図3に示す。冷房期間は5～10月とした。休日は内部発熱が発生しないものとして計算を行った。南側窓面にはブラインドを設置し、給気量は必要換気量とした。図4にブラインドのガラスの性能について示す。

(2) 計算モデル

ESP-r^{10,17)}を用いて建物モデルを作成し、非定常解析を行った。ESP-rは建築物の総合シミュレーションツールであり、オープンソースライセンスの下で利用されている。建物モデルを図5に示す。建物は事務室空間、天井放射パネル、天井懐の3つにゾーン分けされている。事務室空間には空調を設置し、設定室内温度に合わせコントロールされる。天井放射パネルは表面温度を制御できる設定とした。

(3) 計算条件

放射パネル表面温度、放射パネル及び空調の最大冷房負荷の条件を設定し計算を行った。最大冷房負荷計算は建築設備設計基準¹⁸⁾を

表1 建物モデル条件

気象条件	拡張アメダス冷房設計用データ (東京)
床面積	59.88m ² (=6.69m × 8.95m)
天井高	2.7m
天井懐高さ	0.63m
対象室	南面: 外気 西・北・東面: 断熱壁
構成	外壁 (南面): コンクリート150mm、断熱材50mm、中空層、石膏ボード12.5mm 内壁: GW25mm、石膏ボード12.5mm、中空層、石膏ボード12.5mm 床: 断熱材50mm、コンクリート150mm、タイル5mm 窓ガラス (南面): Low-E6mmペア ブラインドあり 人体: 顕熱828W 潜熱636W (12人)
内部負荷	照明: 1000W (下面開放型 19W/m ²) 機器: 1200W (事務機器、OA機器 1100W 複写機、大形事務機器等 100W)
給気量	360m ³ /h
空調運転時間	8:00～20:00 (平日のみ)

図3 内部発熱スケジュール(平日)

図4 入射角と透過率、反射率、日射取得率の関係

基に行った。室内設定温湿度を26℃50%として計算を行い、最大冷房顕熱負荷は4500W、最大冷房潜熱負荷は3300Wとなった。計算条件は夏期(7～9月)、中間期(5～6月、10月)の運用を考え4つのパターンを設定し、パネル表面温度は17℃、19℃、21℃、23℃を用い、それぞれのパターンで計算した。室内が26℃50%の際に露点温度は14.7℃となり、計算上結露の危険性は少ない。計算時間間隔は1分とした。各計算条件における最大冷房顕熱負荷を表2に示す。パネル面積は窓側の天井面積の50%とし計算した。放射パネルと空調の運用方法の違いによる特性を把握するため、A～Cパターンでは特徴的な3つの運用方法を用いて計算を行った。基本パターンでは夏期・中間期を通して同様の運用を行う。以下にパターン概要を示す。

・基本パターン: 夏期・中間期は同様の運用とする。ある程度の顕熱負荷を放射パネルで負担する。EN15377⁹⁾の式より最大放射パネ

図5 建物モデル(ESP-r)

表2 最大冷房顕熱負荷

パネル表面温度17℃	基本	A	B	C
最大冷房顕熱負荷[W]	4500	4500	4500	4500
最大放射パネル負荷[W]	2964	1500	2250	2964
最大空調顕熱負荷[W]	1536	3000	2250	1536
パネル表面温度19℃	基本	A	B	C
最大冷房顕熱負荷[W]	4500	4500	4500	4500
最大放射パネル負荷[W]	2271	1500	2250	2271
最大空調顕熱負荷[W]	2229	3000	2250	2229
パネル表面温度20℃	基本	A	B	C
最大冷房顕熱負荷[W]	4500	4500	4500	4500
最大放射パネル負荷[W]	1568	1500	2250	1568
最大空調顕熱負荷[W]	2932	3000	2250	2932
パネル表面温度23℃	基本	A	B	C
最大冷房顕熱負荷[W]	4500	4500	4500	4500
最大放射パネル負荷[W]	894	1500	2250	894
最大空調顕熱負荷[W]	3606	3000	2250	3606

図6 デシカント空調における空気状態

ル負荷を計算し、最大冷房顕熱負荷から最大放射パネル負荷を除いた分を最大空調顕熱負荷として与えた。パネル表面温度は一定とした。

- ・Aパターン: ベース負荷を放射パネルで負担する。顕熱負荷の変動については空調で対処する。中間期のベース負荷を最大放射パネル負荷とし、最大冷房顕熱負荷から最大放射パネル負荷を除いた分を最大空調顕熱負荷として与えた。パネル表面温度は一定とした。
- ・Bパターン: 中間期は空調のみを使用する。最大冷房顕熱負荷の半分ずつを最大放射パネル負荷、最大空調顕熱負荷として与えた。

図7 室内露点温度とパネル表面温度
(基本パターン(熱交換器): 表面温度17°C)

図8 室内温熱環境と負荷の変動
(基本パターン(熱交換器): 表面温度19°C)

図9 負荷の変動 (基本パターン(熱交換器): 表面温度19°C)

図10 負荷の変動 (Bパターン(熱交換器): 表面温度17°C)

パネル表面温度は一定とした。

- ・Cパターン: 中間期と夏期で水温を変えて運用する。最大冷房顕熱負荷は基本パターンと同様である。中間期はパネル表面温度を2°C上げた。

更に、中間期に放射パネルの面積を小さくした運用について検討するため、中間期の放射パネル面積を窓側の天井面積25%のみとして計算を行った。最大放射パネル負荷、最大空調顕熱負荷は表2の基本パターンと同様である。

外気は熱交換器、デシカント空調を用いて処理した計算をそれぞれ行った。熱交換器は外気と室内からの還気により熱交換を行う。熱交換器の効率は0.7とした。室内温度が外気よりも高い場合は熱交換器を使わない設定とした。デシカント空調では外気条件を図6のように3つに分け、運用方法を変えた。外気が状態Ⅰのときは26°C50%で給気する。状態Ⅱでは26°Cに冷却して給気し、絶対湿度は外気と同様とする。状態Ⅲは外気を室内に直接導入する。

3.2 シミュレーション結果

(1) 結露危険性

図7に代表例として冷房期間における室内露点温度とパネル表面温度の変動を示す。全てのケースにおいてパネル表面温度が室内露点温度を下回ることにはなかった。

(2) 室内温熱環境の経時変化

図8に8月の室内温熱環境と負荷の変動を示す。パネル負荷は一日を通して安定した値となり、空調負荷は外気条件に応じて変動していた。

(3) 負荷変動

図9、図10に冷房期の負荷の変動を示す。グラフより、表2の設定通り負荷が変動していることが分かる。熱交換器を利用した場合、顕熱負荷はピーク時で3800W、潜熱負荷は2500Wとなった。冷房期間6か月においても、パネル負荷の値に大きな変動は見られず、不足分を空調で補っていた。

図11 日平均負荷と平均室温 (熱交換器 表面温度: 17°C)

図12 中間期におけるパネル面積変化の影響

(4) 月別の平均室温と負荷

図11に月別の日平均負荷と平均室温を示す。パネル表面温度を低く設定し、年間を通して同じ運用を行った場合(基本パターン)、中間期の室温は26℃より1℃以上低くなる。空調は室温に合わせたコントロールがある一方で、放射パネルは設定がなく常に表面温度を一定に維持されており、室内を冷却しすぎた為だと考えられる。不必要な冷却を防ぐには中間期は空調のみで運用するか水温を上げて運用する必要がある。尚、中間期の負荷は空調を用いた場合が最も小さくなった。

(5) 中間期のパネル面積変更に関する検討

図12に中間期におけるパネル面積変化の影響を示す。表面温度が低いほどパネル面積あたりの能力が大きいため、面積を減らした影響が大きくなった。

3.3 快適性、給気条件、負荷について

シミュレーション結果から、以下のように快適性、給気条件、負荷についてグラフを作成し検討を進めた。

(1) 快適性について

快適性の検討として月別のSET*を算出した。比較対象の為、一般空調を用いた場合のSET*も算出した。計算では風速0.1m/s、代謝量1.2metとし、室温、相対湿度、MRTはシミュレーションによる結果を用いた。着衣量は5月、10月は0.6clo、その他の月は0.5cloとした¹⁹⁾。図13、14に熱交換器、デシカント空調を用いた8月のSET*のグラフを示す。パネル表面温度が高くなるほどSET*は上がる。室内温湿度は26℃50%に設定しており各ケースほぼ同様の値であり、MRTが高くなるのが原因である。一般空調を用いた場合よりMRTが低い為、SET*は下がった。図13、図14よりSET*の平均値が快適範囲(22.2~25.6℃)²⁰⁾に入らないケースもあった。空気調和・衛生工学会便覧に掲載している夏期の日本人のSET*の中立

温度は26.2℃とされており²⁰⁾、快適範囲よりもSET*が高い場合でもある程度許容できると考えられる。

図15 8月の給気条件(基本パターン(熱交換器))

図16 8月の給気条件(基本パターン(デシカント空調))

図17 デシカント空調の構成図

図18 8月の積算負荷(基本パターン(熱交換器))

図19 8月の積算負荷(基本パターン(デシカント空調))

図13 8月のSET*(基本パターン(熱交換器))

図14 8月のSET*(基本パターン(デシカント空調))

(2) 給気条件について

空調機器による顕熱負荷、潜熱負荷から月別の各表面温度毎のSHF_{Ac}を算出し、空気線図に線を引いた。また、各月の空調顕熱負荷、空調潜熱負荷を除去する場合の風量の違いによる各吹出温湿度を求め、プロットした。図15、図16に熱交換器、デシカント空調を用いた8月の給気条件を示す。熱交換器を用いた場合、夏期に給気風量を減らすには、コイル出口空気温度を下げる為に、チラーの水温を下げるか水量を上げなければならない。コイル出口空気温度14～16℃(空調用冷水温度コイル入口7℃、出口12℃程度)の場合は、風量1000m³/h(必要換気量+640m³/h)以上で給気する必要がある。デシカント空調を用いた場合は、熱交換器を用いた場合より空調で処理する潜熱量が少なくなるため、風量を小さくすることができる。

(3) 月別積算負荷

月別の積算負荷のグラフを作成した。パネル空調負荷、空調顕熱負荷、空調潜熱負荷はESP-rで算出した値を利用した。デシカント空調の負荷はLCEMツール²⁰⁾の計算結果を用いた。LCEMツール内の2ロータ式定格風量2100m³/hのデシカント空調の計算シートを使用した。図17にデシカント空調の構成図を示す。LCEMツールには気象データ、吹出設定温湿度を入力し、1時間毎の外調負荷の計算を行った。LCEMツールを用いて5室分の風量1800m³/hで計算した後、1室分の外調負荷を算出した。処理空気と再生空気の風量比は1：1である。図18、19に熱交換器及びデシカント空調を用いた8月の積算負荷を示す。表面温度が高くなるほど、全顕熱負荷におけるパネル負荷の割合は小さくなる。デシカント空調では温水(加熱コイル)の負荷が大きな割合を占め、8月の負荷の合計は熱交換器の倍近くなる。但しこの負荷は太陽熱や排熱で賄うことができる可能性があり、そのようなシステムがある場合はデシカント空調は有用であると考えられる。

3.4 運用ケースの選定

クライアントや設計者により求める室内環境が異なることから選定される運用ケースは変わる。表3では選定する際に重要視する項目を変更し、それぞれの最適な運用ケースを提案する。入口水温と流量は、出入口温度差を3℃として算出した。パネルの熱抵抗値は三村らの研究²²⁾を参考に0.021m²・K/Wとし、平均水温を算出した。6月は梅雨の為、顕熱比が5月、10月と異なり、運用方法を分けて考えた。各ケースで冷房負荷や運用方法は異なった。結露危険

性が低いケースでは、中間期は空調のみを用いる運用とし選定した。デシカント空調を利用したケースでは風量を抑えられ、ドラフトによる不快感を減らすことができる。風量の大小によって、ドラフトを防ぐため吹出方法も変わる可能性がある。放射パネルで大半の顕熱を処理するケースではパネル表面温度が低い分パネル負担割合は大きくなった。

4. 総括

運用方法を考慮した、建築物総合シミュレーションツールを用いた天井放射冷房の設計方法について提案した。その結果、以下の知見を得た。

- 1) シミュレーション結果から夏期・中間期の運用方法と放射パネルと空調の冷房能力、パネル表面温度、必要パネル面積、水温等について同時に決定することができた。
- 2) 今回の計算では、全てのケースにおいてパネル表面温度が室内露点温度を下回ることにはなかった。
- 3) パネル負荷は1日を通して安定した値であり、外調負荷は室内・外気条件に応じて変動することが確認できた。
- 4) 不必要な冷却を防ぐ為に、中間期は空調のみで運用するか水温を上げて運用する必要があることが分かった。
- 5) MRTの違いより、一般空調を用いた場合より放射パネルを用いたほうがSET*は低い値となった。
- 6) 熱交換器やデシカント空調を用いることで空調で除去すべき潜熱量が変化することから、コイル出口空気温度及び風量が変わり、システム選定に影響することが確認できた。
- 7) デシカント空調を用いた場合、月別積算負荷において温水負荷が大きな割合を占めるが、太陽熱や排熱で賄うことができる可能性があり、そのようなシステムがある場合はデシカント空調は有用であると考えられる。
- 8) 天井放射冷房の設計は一樣に決定するわけではなく、クライアントや設計者の意図によって変化することを示した。シミュレーションを用いて設計を行うことで運用方法を踏まえて目的に応じた最適な天井放射冷房システムの設計が期待できる。

謝辞

本研究においてSeoul National University Kwang Woo Kim教授、Chang Ho Jeong氏に天井放射冷房システムの設計方法と運用

表3 選定パターンによる設計と運用方法

運用ケース	結露危険性が少ないケース			パネルを長期間使用するケース			放射パネルで大半の顕熱を処理するケース			快適性を重視するケース(排熱あり)		
	夏期 7-9月	中間期 5、10月 6月		夏期 7-9月	中間期 5、10月 6月		夏期 7-9月	中間期 5、10月 6月		夏期 7-9月	中間期 5、10月 6月	
冷房負荷	パネル 1500W (ピーク時)			2200W (ピーク時)	1100W (ピーク時)		2900W (ピーク時)	2200W (ピーク時)		1500W (ピーク時)	1500W (ピーク時)	
	空調(顕熱) 2300W (ピーク時)	2300W (ピーク時)		1600W (ピーク時)	1600W (ピーク時)		900W (ピーク時)	800W (ピーク時)		2300W (ピーク時)	1500W (ピーク時)	
	空調(潜熱) 2500W (ピーク時)	2000W (ピーク時)		2500W (ピーク時)	2000W (ピーク時)		2500W (ピーク時)	2000W (ピーク時)		700W (ピーク時)	700W (ピーク時)	
パネル表面温度	21℃			19℃	19℃		17℃	19℃		21℃	21℃	
水温	平均水温 20℃			18℃	18℃		15℃	18℃		20℃	20℃	
	入口水温 19℃			16℃	16℃		14℃	16℃		19℃	19℃	
流量	7.2 L/min			10.5 L/min	5.3 L/min		13.9 L/min	10.5 L/min		7.2L/min	7.2L/min	
パネル面積	50%			50%	25%		50%	50%		50%	50%	
運用	放射パネル利用 ○	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	熱交換器/デシカント空調 再熱 ○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
風量	1000m ³ /h (必要換気量+640)	必要換気量 1000m ³ /h (必要換気量+640)		1000m ³ /h (必要換気量+640)	必要換気量 1000m ³ /h (必要換気量+640)		1000m ³ /h (必要換気量+640)	必要換気量 1000m ³ /h (必要換気量+640)		500m ³ /h (必要換気量+140)	必要換気量 500m ³ /h (必要換気量+140)	
	コイル出口空気温度 13-15℃	14-16℃	14-16℃	13-15℃	14-16℃	14-16℃	13-15℃	14-16℃	14-16℃	14-16℃	14-16℃	14-16℃
パネル負荷 822kWh				2437kWh			3267kWh			2297kWh		
パネル顕熱負担割合 0.28				0.76			0.94			0.68		

方法を、大成建設(株)三村渉氏に天井放射冷房システムのシミュレーションについて貴重な助言を頂きました。この場を借りて謝意を表します。

参考文献

- 1) 空気調和・衛生工学会編：第14版 空気調和・衛生工学便覧 3. 空気調和設備編，空気調和衛生工学会，p. 277，2010. 02
- 2) 大森敏明・梁禎訓・加藤信介・村上周三：大規模・複雑形状に対応する対流・放射連成シミュレーション用放射伝熱解析法の開発 第2報対流・放射連成解析による実人体周りの温熱環境の解析，空気調和・衛生工学会大会論文集，No. 90，pp. 93-102，2003. 07
- 3) Robert, Bean; Bjarne, W. Olesen; Kwang Woo, Kim: History of Radiant Heating and Cooling Systems Part2, ASHRAE Journal, 52, pp. 50-55, 2010. 2
- 4) 「建築設備と配管工事」編集委員会編：「建築設備と配管工事」1月増刊号人と環境に優しい放射・輻射空調，日本工業出版株式会社，2011. 01
- 5) 伊藤直明・石野久彌・大塚淳・佐々木元康：天井輻射冷房に関する基礎的実験研究，日本建築学会大会学術講演梗概集 D分冊，pp. 893-894，1989. 10
- 6) 久保隆明・近本智行・岡本茂・小林知広・川端真彰：天井放射空調の住宅への適用に関する評価研究，その2 CFD解析による快適性及び室内温熱環境評価，日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2分冊，pp. 989-990，2013. 08
- 7) 空気調和・衛生工学会編：第14版 空気調和・衛生工学便覧 3. 空気調和設備編，空気調和衛生工学会，pp. 277-278，2010. 02
- 8) ASHRAE：2012 ASHRAE Handbook HVAC Systems and Equipment SI edition - Ch.6 Panel Heating and Cooling, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2012. 06
- 9) EN15377-1: Design of embedded water based surface heating and cooling systems - Determination of the design heating and cooling capacity, European Committee for Standardization, 2005
- 10) 鬼頭則夫・水谷国男・桑原亮一・佐藤英樹・塩谷正樹：天井放射空調システムの制御に関する研究 その5 年間の供給熱量特性に関する解析結果，日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2分冊，pp. 1347-1348，2008. 09
- 11) 久木田亮子・中村元：天井放射パネル空調システムを用いた室内環境設計手法に関する研究（第4報）年間熱負荷及び熱源用消費エネルギーシミュレーション，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp. 1947-1950，2012. 09
- 12) 迫博司・高橋幹雄・大倉俊雄・桑原亮一：放射環境を考慮したオフィス空調に関する研究，第1報 PMV制御を用いた自然換気・放射パネル併用アンダーフロア空調の計画，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp. 421-424，2009. 09
- 13) 岡本茂・三浦光城・山口弘雅・尾本和夫・高岡昌史・岡建雄：天井放射冷暖房用パネルの性能予測計算方法と実験値の比較，日本建築学会環境系論文集，第73巻，pp. 221-227，2008. 02
- 14) 塩谷正樹・郡公子・鬼頭則夫：スリットを有する天井放射パネルユニットの熱性能に関する研究，日本建築学会環境系論文集，第78巻，pp. 31-37，2013. 01
- 15) 国立天文台：理科年表 平成22年，丸善株式会社，2011. 11
- 16) ESRU： “ESP-r Control Tutorial” .ESP-r. http://www.esru.strath.ac.uk/Programs/ESP-r_tut/control.htm, (参照 2013-09-12).
- 17) 小玉裕一郎・武政孝治・宮岡大・松元良枝：ESP-rとRadianceによる建築環境シミュレーション入門，株式会社オーム社，2011. 04
- 18) 国土交通省大臣官房庁営繕部・環境課：建築設備設計基準 平成21年版，公共建築協会／全国建設研修センター，2009. 10
- 19) 猪股悦子・後藤伴延・三田村輝章・吉野博・田村明弘：オフィスにおける在室者の温熱適応性に関する実測調査，その5 着衣量および快適温度に関する考察，日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2分冊，pp. 463-464，2006. 09
- 20) 空気調和・衛生工学会編：第14版 空気調和・衛生工学便覧 1. 基礎編，空気調和衛生工学会，p. 334，337，2010. 02
- 21) 国土交通省：LCEMツール Ver 3. 03, 2011-03-02. http://www.mlit.go.jp/gobuild/sesaku_lcem_lcemtool_index.htm, (参照 2013-09-12)
- 22) 三村渉・羽山広文・森太郎・菊田弘輝・田中智明：天井放射冷房システムにおけるサビサビリティの検討 空気調和・衛生工学会北海道支部第46回学術講演会論文集，pp. 41-44，2012. 3
- 23) 三村渉・羽山広文・森太郎・菊田弘輝・田中智明：天井放射冷房システムにおけるサビサビリティの検討 その1 数値モデルを用いた設計条件の検討，日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2分冊，pp. 959-960，2012. 9
- 24) 松本若菜・森太郎・三村渉・羽山広文・菊田弘輝：天井放射冷房システムにおけるサビサビリティの検討 その2 数値非定常解析による室内温熱環境の検討，日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2分冊，pp. 983-984，2013. 8
- 25) 松本若菜・森太郎・三村渉・羽山広文・菊田弘輝：天井放射冷房システムにおけるサビサビリティの検討 その3 調湿外気処理機による負荷の影響，日本建築学会北海道支部研究報告集，pp. 209-212，2013. 6
- 26) 松本若菜・森太郎・三村渉・羽山広文・菊田弘輝：天井放射冷房システムにおけるサビサビリティの検討 その4 デシカント空調併用時の運用に関する数値解析，空気調和・衛生工学会大会論文集，pp. 453-456，2013. 9

DESIGN METHOD OF RADIANT CEILING COOLING SYSTEM
BY USING INTEGRATED ENERGY MODELING TOOL
FOR BUILDING SIMULATION

– Proposal of system planning based on operation in summer and moderate seasons –

Wakana MATSUMOTO^{}, Taro MORI^{**}, Hirofumi HAYAMA^{***}
and Koki KIKUTA^{****}*

^{*} Obayashi Corporation, M. Eng.

^{**} Assoc. Prof., Faculty of Eng., Hokkaido Univ., Dr. Eng.

^{***} Prof., Faculty of Eng., Hokkaido Univ., Dr. Eng.

^{****} Assist. Prof., Faculty of Eng., Hokkaido Univ., Dr. Eng.

Radiant ceiling cooling system can achieve thermal comfort and energy conservation. However, system can satisfy only sensible cooling load, radiant ceiling cooling panels are used with other equipment for dehumidification, ventilation and cooling. Design method of ASHRAE Handbook and EN 15377 decide a system only for peak load. Operation in moderate seasons isn't considered. The SHR (Sensible Heat Ratio) in moderate seasons may be different from that in summer, thus re-check based on operation in moderate seasons is need. In addition, climate of Japan is high temperature and high humidity in summer, therefore there is a risk of dew condensation on a panels. From these problems, an operation method of a panels with other equipment in summer and moderate seasons and an operation method to keep a thermal comfort without dew condensation have to be considered. The objective of this paper was to propose the design method of radiant ceiling cooling system based on operation by using building simulation.

In design method using simulation, 1st., some simulation cases are determined with consideration for some parameters such as cooling capacity of air-conditioning system, panel surface temperature and operation method. After the simulation, operation method in summer and moderate seasons is determined depend on simulation results such as thermal comfort, dew condensation, indoor thermal environment, variation of cooling load, SHR_{AC} (Sensible Heat Ratio of Air-Conditioning system) and monthly energy consumption. Then panel area, panel water temperature, panel surface temperature, air-conditioning system and supply air flow rate can be decided in each season. In the design method, repeating review is no need and design value can be decided easily. Various data is output by simulation. Designers have to think the best design to satisfy requirements and suggest cooling system and operation to their clients.

Some design case was suggested using the design method we proposed. The target room is an office room in a mid-floor of building in Tokyo. ESP-r is used as simulation software. The building model made by ESP-r had three zones. In the office room, there is an air-conditioning system. The air-conditioning system is controlled by the set temperature and humidity. The radiant cooling panels are controlled by panel surface temperature. The cooling period is from May to October. In the simulation, 4 patterns of operation method were used. In Pattern Basic, operation method is same in summer and in moderate seasons. Most sensible heat load is removed by radiant cooling panels. In Pattern A, base load is removed by radiant cooling panels. Control of load is handled by air-conditioning system. In Pattern B, radiant cooling panels and air-conditioning system are used in summer. In moderate seasons, only air-conditioning system is used. In Pattern C, supply water temperature is changed every season. In only Pattern C, panel surface temperature in moderate seasons is 2°C higher than that in summer. Furthermore, every client and designer has different idea, thus operation to be selected is changed. The optimal operation and design when we change the first priority was suggested.

As a result, the design value of radiant ceiling panels and air-conditioning can be decided easily by using simulation results and that the optimal design and operation depend on first priority of clients and designers such as thermal comfort and prevention of dew condensation. If simulation is used in design phase, it can be expected optimal design of radiant ceiling cooling system depend on operation.

(2014年5月4日原稿受理, 2014年9月22日採用決定)