

石膏ボード天井面を利用した放射冷暖房システムの開発

滝澤 勇輝 *1 小野 幹治 *1

概 要

医療福祉施設等の居住者が長時間仰臥状態にある施設では、「鉛直温度分布」や「不快気流感」の少ない天井面放射冷暖房システムが注視されている。しかし、現在の一般的なシステムは、冷温水循環装置や金属性システム天井等の専用部材を必要とするため、今後の普及には導入コスト面の課題解決が必須である。

そこで、筆者らは、ロフト内の空調により天井面を調温する、一般建材で構成された放射冷暖房システムを開発した。

本報では、開発したシステムにおける各種熱伝達率を推定した。その結果、ロフト下面の対流熱伝達率は、ロフト上面に対し冷房運転時で 3.1 倍、暖房運転時で 1.7 倍となり、ロフト下面の天井面を優先的に調温する傾向があることを確認した。また、4 床室に適用した際の年間熱負荷計算を行った。その結果、本システムの顕熱負荷が、対流式空調の顕熱負荷より、小さくなるのは、少なくとも断熱材厚さ+50mm 以上が必要であることを確認した。また、外皮が面する方位 S、断熱材厚さ+50mm のとき、夏季の空調負荷に対する室天井からロフトに流入した熱量の割合は、91.6%、冬季の空調負荷に対するロフトから室天井に流出した熱量の割合は、77.8%となり、ロフトの上側面からの熱の出入りが大きくなることを確認した。

Radiant Cooling/Heating System using a Plasterboard ceiling

Abstract

In medical facilities where people are in a supine position, ceiling radiation cooling/heating systems with lower 「indoor vertical air temperature profile」 and 「unpleasant airflow feeling」 are problematic.

Therefore, the authors developed a Radiant cooling/heating system that adjusts the temperature of a ceiling surface using air-conditioning in a ceiling plenum made of common building materials.

In this paper, various heat transfer coefficients of the developed system were assumed. As a result, it was found that adjustment of the temperature of the lower surface of the ceiling plenum was more effective than for the upper surface of a ceiling plenum. Moreover, annual thermal load calculation at the time of applying this system to a 4 bed room was performed. As a result, it was also found that the sensible heat load of this system was less than that of general air-conditioning system when the layer of thermal insulation installed is at least 50mm thicker than that usually used for a general ceiling plenum.

キーワード：放射冷暖房、4床室、表面温度分布、対流熱伝達率、天井裏空間、石膏ボード、年間熱負荷

*1 建設本部 環境エンジニアリングセンター

§1. はじめに

医療福祉施設等の居住者が長時間仰臥状態にある施設では、「鉛直温度分布」や「不快気流感」の少ない室内温熱環境が求められており、QOL 向上の手段として天井面放射冷暖房システムが注視されている。しかし、現在の一般的なシステムは、冷温水循環装置や金属性システム天井等の専用部材を必要とするため、今後の普及には導入コスト面の課題解決が必須である。そこで筆者らは、専用部材の排除を優先し、一般建材で構成された天井を放射面とする放射冷暖房システムの開発を進めている。

本報では、実験装置による測定結果から、熱収支再現のための各種熱伝達率の推定、及び、放射面の温度分布状況の確認を行う。また、各種熱伝達率の推定結果を利用した年間熱負荷計算により、4床室に適用した際の熱負荷特性を確認する。

§2. システム概要

本システムは、密閉天井裏空間(以下「ロフト」)内の空調により天井面(放射面)を調温するため、「空調空気循環式放射冷暖房」に該当する。4床室適用時の冷房運転イメージを図1に示し、システムの特徴を以下に示す。

- 熱源はロフト内に設置されたダクト式エアコン。
- 空調一次空気はフレキダクトを通じ、居住者直上の天井面にロフト側から下向きに吹付けられる。
- ロフトの上面と鉛直面は吹付ウレタンにより断熱補強。
- 天井材は石膏ボード+透湿クロス仕上げとし、冷房運転時は低湿状態のロフト側から居室上部空気を除湿。

§3. 実験装置概要

図2、及び、表1に実験装置の概要を示す。鉄骨構造建屋内の空調可能な実験スペースに建設された放射冷暖房実験装置は、一般的な4床室の居室空間、及び、ロフト形状を模擬している。天井材は熱抵抗と湿気伝達抵抗の小ささから、PB9.5mmの透湿クロス仕上げとし、一般的な鋼製天井下地と吊ボルトで支持している。また、各種センサー類は、室の対象性を利用し、ビルトインエアコンを中心軸とした片側のみに設置している。

§4. ロフト内の対流熱伝達率の推定

ロフト内にはビルトインエアコンからの空調噴流により特殊な流れ場が形成される。ロフト上面、及び、ロフト下面の対流熱伝達率は、冷房運転時、及び、暖房運転時のそれぞれについて、各種測定温度の定常状態3時間平均値(測定間隔1分)を元に、各表面の熱平衡式から推定した。熱平衡式に必要な対面間の放射熱伝達率、及び、居室空間の対流熱伝達率には、空調負荷計算で使用する一般的な値を採用している^(文1, 2)。

表2に、各種測定値、及び、対流熱伝達率の推定結果を示す。ロフト下面の対流熱伝達率は、ロフト上面に対し冷房運転時で3.1倍、暖房運転時で1.7倍となった。暖房運転時は、ロフト下面で下向き熱流、ロフト上面で上向き熱流となるため、倍率が冷房運転時より劣っていたが、冷暖房共、ロフト上面に対し、ロフト下面の天井面(放射面)を優先的に調温する傾向があり、下向き空調噴流の有効性が確認できた。

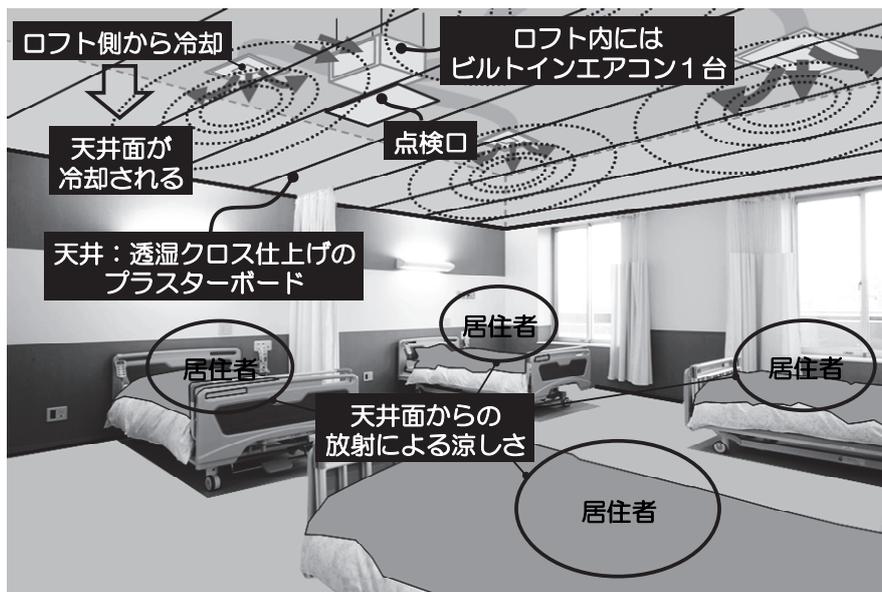


図1 放射冷暖房システムの4床室適用イメージ

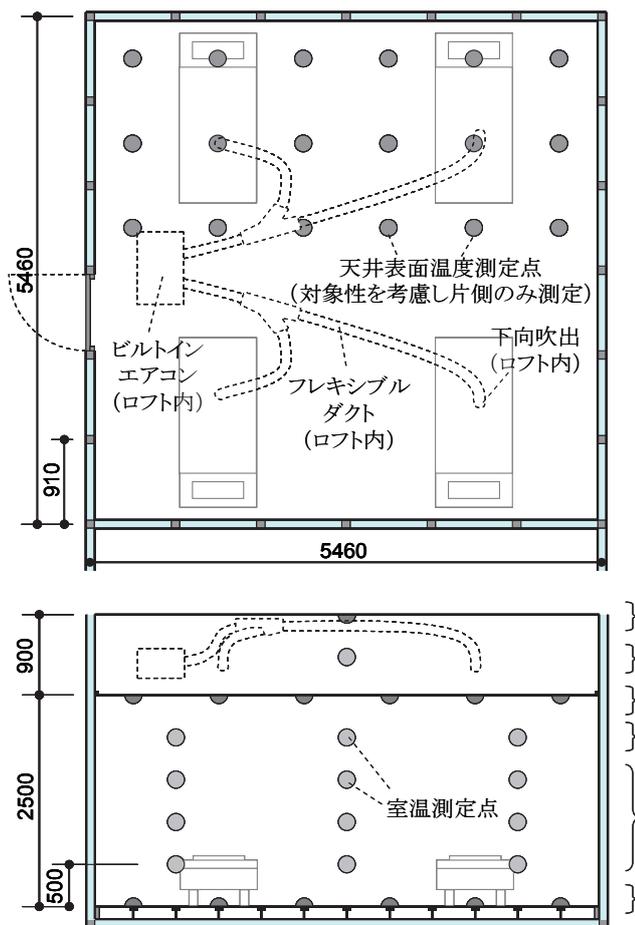


図2 実験装置の平面図(上)と断面図(下)

表1 実験装置の概要

施設構造	天井	PB9.5mm、鋼製天井下地による吊り天井方式 (木造軸組)	下面のみ透湿クロス仕上げ (0.043m ² K/W)
	鉛直壁	PB9.5mm+スタイロフォーム100mm+PB9.5mm	両面ビニルクロス仕上げ (2.718m ² K/W)
	床	フローリング材10mm+パーティクルボード20mm +空気層100mm+スタイロフォーム100mm	
空調設備	エアコン	天井埋込ビルトインタイプ200V (5K)	
	ダクト	φ150 消音型断熱フレキシブルダクト	
外部空間		温湿度制御が可能な閉鎖空間 (鉄骨造建物内)	
測定点	ロフト上面	表面温度1点	(熱流板+T熱電対)
	ロフト中間	中間高さ空気温湿度1点	(T&D社 TR77Ui)
	天井表面	表面温度18点	(T熱電対)
	居室空間	空気温度12点	(T熱電対)
	床表面	表面温度6点	(T熱電対)

表2 測定結果と各種熱伝達率の推定値

			冷房運転時	暖房運転時
ロフト上面	表面温度	°C	21.9	29.9
	上向全熱流量	W/m ²	-22.9	29.8
ロフト中間	空気温度	°C	19.5	34.7
天井面	平均表面温度	°C	23.1	29.5
居室上部	3点平均室温	°C	28.1	24.1
居室下部	9点平均室温	°C	27.7	21.7
床表面	平均表面温度	°C	27.1	21.4
周囲空間	平均空気温度	°C	30.8	19.1
ロフト上面对流熱伝達率	W/m ² K	8.3	11.6	
ロフト下面对流熱伝達率	W/m ² K	25.6	19.8	
居室上下間の拡散による熱伝達率	W/m ² K	—	5.0	

ただし、各放射熱伝達率は4.7、居室空間の対流熱伝達率は鉛直面で4.7、水平面上向き熱流時で4.7、水平面下向き熱流時で2.3として同定した。

§5. 居室空間内の拡散による熱伝達率の推定

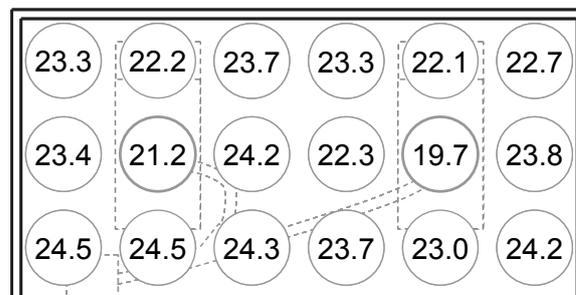
暖房運転時は、天井面近傍に熱気が停滞するため、天井面温度と居室空間室温の差の拡大効果が期待できる。当現象をゾーンモデルにより再現するため、前述の手法と同様に、居室上下間の拡散による熱伝達率を推定した結果、温度成層形成に十分な値(5.0W/m²K、表2)が得られた。

§6. 天井面(放射面)の表面温度分布

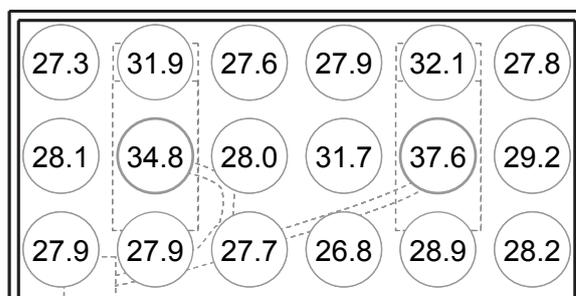
図3に示す表面温度分布は、前述の係数推定の際に採用した冷房運転時、及び、暖房運転時の定常状態3時間平均温度を表している。

冷房運転時は、全天井表面の平均温度23.1°Cに対し、空調吹き出し直下で3.4°C低い19.7°Cを記録した。当温度は居室空間の相対湿度が61%のときの露点温度に相当する。暖房運転時は、全天井表面の平均温度29.5°Cに対し、空調吹き出し直下で8.1°C高い37.6°Cを記録している。

冷暖房共に、ビルトインエアコン側の空調吹き出し直下より、直線的なダクトでつながれた反対側の空調吹き出し直下のほうがより強い放射感が得られることが確認できた。



冷房運転時 居室下部平均室温：27.7°C



暖房運転時 居室下部平均室温：21.4°C

図3 放射面(天井面)の表面温度分布

§7. 計算概要

本システムは、ロフトの上面、側面部位の断熱性能によって、省エネルギー性能、導入コストが変化する。ロフトの上面、側面部位の断熱性能、及び、外皮が面する方位の違いによる顕熱負荷の把握、夏季および冬季の居室、ロフトにおける隣室との熱収支構造を明らかにすることを目的とし、本システムを4床室に適用した際の熱収支シミュレーションを行い、対流式空調との比較を行った。

表3に各部位仕様、表4に計算条件、図5、6に計算モデルの回路図(平面、断面)を示す。表3の各部位の仕様を基準モデルとし、計算パターンを表4の空調方式、外皮が面する方位、ロフトの上面、側面の断熱材厚さの基準モデルに対する増分のそれぞれの組み合わせによる計24パターンの計算を行った。

計算対象室は、室空間を上下2層に分割し、計算を行っている。居室上下の拡散による対流熱伝達率については、放射暖房時、5.0W/m²Kを用い、放射冷房時、対流式空調時は、限りなく大きい値を使用した。

対流式空調時の計算対象室に隣接する空間は、「A面」に屋外、「D面」に廊下、「B、C、E、F面」に計算対象室と同様の対流式空調室とした。放射冷暖房時の計算対象室に隣接する空間は、「A面」に屋外、「D面」に廊下とし、「B、C、E、F面」は、上記対流式空調室とし、対流式空調時の計算対象室の計算結果と同値になるように設定した。

換気については、廊下に外調機から新鮮空気が供給されると想定し、廊下から居室下部へ、居室下部から居室上部へ、居室上部から屋外へ排出されるものとした。

日射については、開口部を透過した日射は、全て床面に当たるものとし、床面の日射吸収率分は、床面が吸収し、床面の日射反射率分は、完全拡散するものとして、室内の各面に対する立体投射角による形態係数により、分配するものとした。

今回は、本システムの年間熱負荷の特性の把握が目的であるため、潜熱については考慮していない。

表4 計算条件

	方位	断熱材厚さ	パターン数
放射冷暖房	N	±0mm	20パターン
	E	+25mm	
	S	+50mm	
	W	+75mm +100mm	
対流式空調	N	±0mm	4パターン
	E		
	S		
	W		
居室寸法	B6,000mm × W6,000mm × H2,500mm		
計算間隔	1.0h (後退差分法)		
計算期間	1~12月 (1年間)		
冷房期	5、6、7、8、9、10月		
暖房期	1、2、3、4、11、12月		
空調稼働時間	24時間運転		
空調制御	居室作用温度 24.0°C		
換気回数	2.0回/h		
居室負荷	顕熱負荷 440W		
廊下温度	【冷房】28.0°C 【暖房】20.0°C		
気象データ	東京都標準年拡張アメダス気象データ(文3)		
対流熱伝達率	上向き4.7W/m ² K 下向き2.3W/m ² K		
放射熱伝達率	4.7W/m ² K		
ロフト上面对流熱伝達率	【冷房】8.3°C 【暖房】11.6°C		
ロフト下面对流熱伝達率	【冷房】25.6W/m ² K 【暖房】19.8W/m ² K		
居室上下の拡散による対流熱伝達率	【冷房】∞W/m ² K 【暖房】5.0W/m ² K		

表3 各部位仕様概要(基準)

居室	天井	PB9.5mm
	外壁	PB12.5mm+硬質ウレタン25mm+コンクリート100mm
	間仕切	PB12.5mm+GW65mm+PB12.5mm
	床	コンクリート180mm
	開口部	普通複層ガラスFL3mm+A6mm+FL3mm
ロフト	外壁	硬質ウレタン25mm+コンクリート800mm
	間仕切	コンクリート600mm

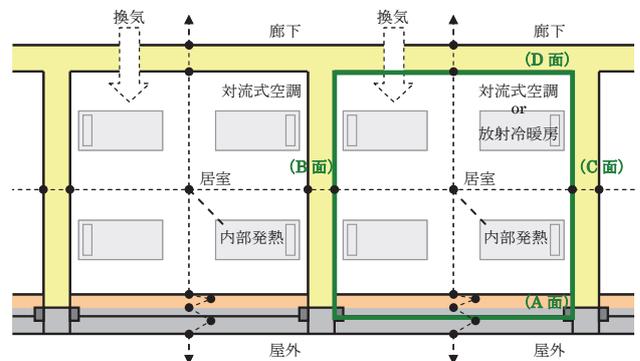


図5 回路図(平面)

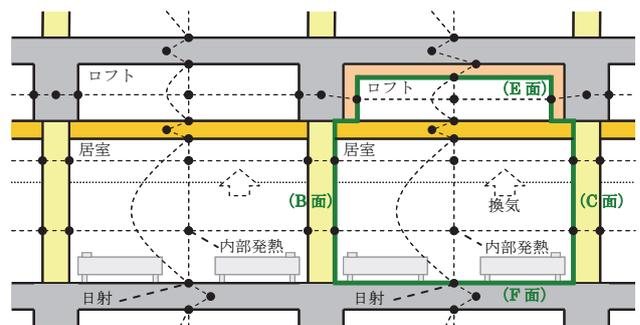


図6 回路図(断面)

§8. 顕熱負荷特性

図7に外皮が面する方位ごとの断熱材厚さに対する顕熱負荷を示す。外皮が面する方位 N の時、放射冷暖房の負荷は、基準の断熱材厚さより、冷房時の顕熱負荷+50mm、暖房時の顕熱負荷+50mm、年間の顕熱負荷+50mm で対流式空調の負荷と同程度になった。また、外皮が面する方位 E、S、W の時、放射冷暖房は、基準の断熱材厚さより、冷房時の顕熱負荷+50mm、暖房時の顕熱負荷+75mm、年間の顕熱負荷+50mm で対流式空調の負荷と同程度となった。これらより、本計算条件において、放射冷暖房が対流式空調に対して、顕熱負荷における省エネルギー性能に優位性が得られるのは、少なくとも断熱材厚さ+50mm 以上が必要であることが確認できた。

§9. 熱収支構造

図8、9に外皮が面する方位 S の断熱材厚さ+50mm の夏季および冬季における居室空間、ロフト内空間の熱収支構造を示す。居室、ロフトの熱流入を正、熱流出を負とし、各表面からの対流熱流量のみを集計している。なお、年間で気温が最も高い時間、最も低い時間をそれぞれ夏季、冬季の代表日時とした。

夏季は、放射冷暖房の外皮からの熱流入量が 373.4W、対流式空調の外皮からの熱流入量が 473.5W となり、放射冷暖房の外皮からの熱流入量は、対流式空調の外皮からの熱流入量に対して0.8倍となった。また、放射冷暖房の換気による熱流入量は、134.7W、対流式空調の換気による熱流入量は、325.1W となり、放射冷暖房の換気による熱流入量は、対流式空調の換気による熱流入量に対して 0.4 倍となった。冬季は、放射冷暖房の換気による熱流出量は、182.8W、対流式空調の換気による熱流出量は、265.0W となり、放射冷暖房の換気による熱流出量は、対流式空調の換気による熱流出量に対して0.7倍になった。

また、夏季の放射冷暖房のロフト内の空調機の負荷は、2022.6W、室天井からロフトに流入した熱量は、1852.1W となり、空調負荷に対する室天井からロフトに流入した熱量の割合は、91.6%となった。冬季の放射冷暖房のロフト内の空調機の負荷は、678.2W、ロフトから室天井に流出した熱量は、527.7W となり、空調負荷に対するロフトから室天井に流出した熱量の割合は、77.8%となった。

以上より、外皮が面する方位 S、断熱材厚さ+50mm のとき、夏季、冬季の代表日時において、本システムは、対流式空調に比べ、換気、貫流による負荷が軽減すること、ロフト上面、側面からの熱流入出が大きくなることを確認できた。

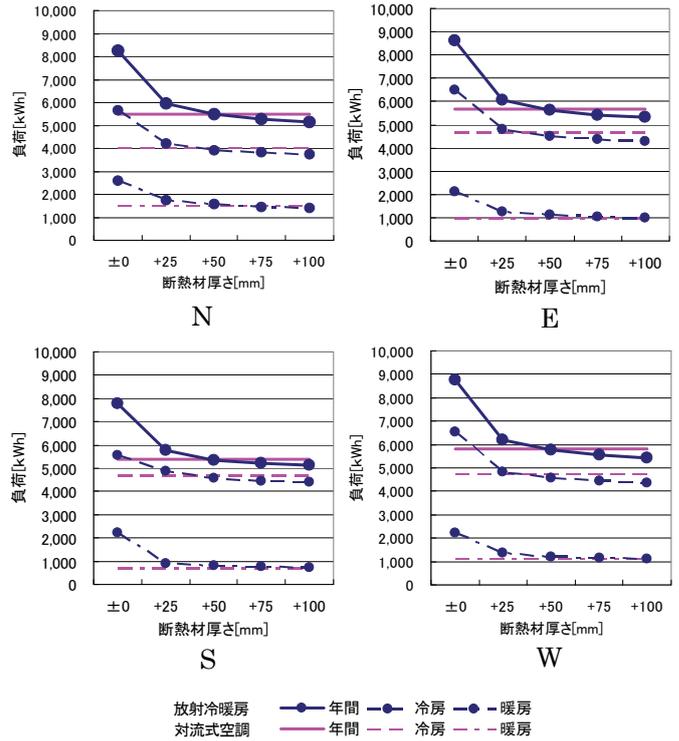


図7 断熱材厚さに対する顕熱負荷

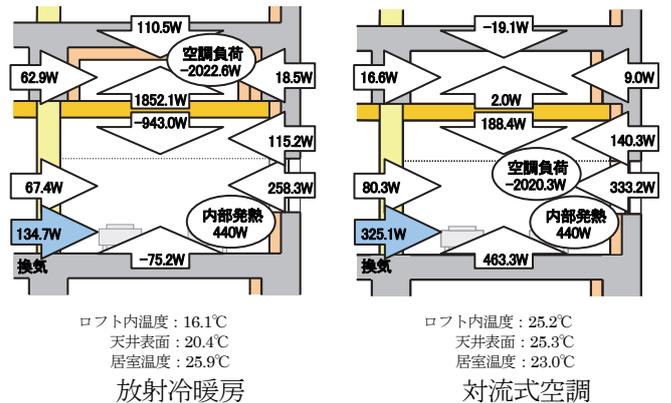


図8 夏季 (7月17日13時) の熱収支構造

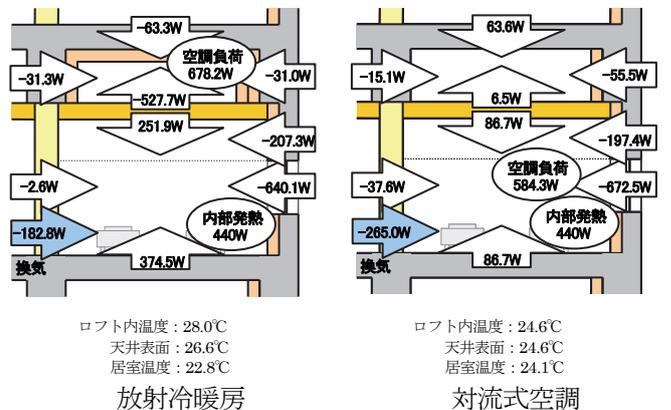


図9 冬季 (2月25日5時) の熱収支構造

§10. 結論

本報では、実験装置による測定結果から、熱収支再現のための各種熱伝達率の推定、及び、放射面の温度分布状況の確認を行った。また、各種熱伝達率の推定結果を利用した年間熱負荷計算により、4床室に適用した際の熱負荷特性を確認した。

- ・ロフト下面の対流熱伝達率は、ロフト上面に対し冷房運転時で 3.1 倍、暖房運転時で 1.7 倍となり、ロフト上面に対し、ロフト下面の天井面を優先的に調温する傾向が見られた。
- ・放射冷暖房の顕熱負荷が対流式空調の顕熱負荷より、小さくなるのは、基準モデルに対して、少なくとも断熱材厚さ+50mm 以上が必要であることを確認した。
- ・外皮が面する方位 S、断熱材厚さ+50mm のとき、夏季、冬季の代表日時において、本システムは、対流式空調に比べ、換気、貫流による負荷が軽減すること、ロフト上面、側面からの熱流入出が大きくなることを確認した。

以上より、本システムの課題として、天井材やロフト上面、側面の断熱材の最適な熱抵抗値を検討し、ロフト上面、側面に対し、ロフト下面の天井面(放射面)をより効率良く調温する必要がある。

参考文献

- [1]木村健一:建築設備基礎、国際人間環境研究所、2011、4
- [2]空気調和・衛生工学会:試して学ぶ熱負荷 HASPEE 新最大熱負荷計算法、丸善出版、2012、10
- [3]赤坂 他:拡張アメダス気象データ、日本建築学会、2000



滝澤 勇輝

ひとこと

今後は、実際の医療福祉施設に本システムを適用し、居住者の快適性、システムの省エネ性について、検証していきたいと考えています。また、医療福祉施設以外の他の用途においても、低コストで提供可能な放射冷暖房システムの提案を行いたいと考えています。