

博士論文

天井放射パネル空調の設計手法に関する研究

伊藤 清

天井放射パネル空調の設計手法に関する研究

目次

第1章 はじめに	
1.1 背景	2
1.2 放射空調システムの分類	5
1.3 天井放射パネル空調の課題	9
1.4 本研究の取り組む課題	16
1.5 論文の構成	17
第2章 実大モックアップを用いた天井放射パネル冷却能力検証実験	
2.1 既往研究の課題と本章の位置づけ	24
2.2 高敷設率条件での天井放射パネルの性能検証実験	26
2.3 高開口率の天井放射パネルの様々な敷設条件での性能検証実験	42
2.4 まとめ	57
第3章 適用建物における天井放射パネル冷却能力検証	
3.1 既往研究の課題と本章の位置づけ	60
3.2 実測対象天井放射パネル空調システム	60
3.3 実測期間	63
3.4 2012年実測	63
3.5 2013年実測	68
3.6 まとめ	79
第4章 天井放射パネル空調熱収支モデル	
4.1 既往研究の課題と本章の位置づけ	80
4.2 熱収支式によるモデル化	82
4.3 天井放射パネル放熱特性検証基礎実験	87
4.4 基礎実験結果	93
4.5 基礎実験データを用いた伝熱係数の同定	99
4.6 実大実験データを用いた伝熱係数の同定	110
4.7 まとめ	114
第5章 天井放射パネル空調性能予測手法	
5.1 既往研究の課題と本章の位置づけ	120
5.2 天井放射パネル空調性能予測手法の導出	122
5.3 各種能力線図の導出例	134
5.4 まとめ	147

第6章 天井放射パネル空調の熱負荷計算手法の提案と熱負荷特性の把握	
6.1 既往研究の課題と本章の位置づけ	150
6.2 熱回路網計算プログラムの検証	151
6.3 ケーススタディの条件と熱負荷計算方法	161
6.4 シミュレーション結果	165
6.5 まとめ	173
第7章 設計手法の提案と省エネルギー性能評価	
7.1 既往研究の課題と本章の位置づけ	176
7.2 天井放射空調システム設計フロー	179
7.3 提案設計フローの試行	186
7.4 省エネルギー性能評価方法	204
7.5 エネルギー消費量計算結果	216
7.6 まとめ	226
第8章 おわりに	
8.1 本論文で得られた成果	230
8.2 本論文の課題	232
8.3 展望	234
論文目録	237
謝辞	241

第1章 はじめに

第1章 はじめに

1.1 背景

建築において、地球環境への負荷を最小限に抑えつつ、人類に健康で快適な室内温熱環境を提供することが空気調和工学のテーマである。産業革命以来、人類は化石燃料由来のエネルギーを用いて、生活に必要な製品やサービスを提供することで、生活水準を向上させてきた。空気調和工学においては、冷凍サイクルの発明により、他の産業と同様に化石燃料由来のエネルギーを用いて、冷熱を生産することが可能となり、空気調和工学が急速な発展を遂げてきた¹⁾。

一方で、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）が発行した評価報告書により、人類の化石燃料由来の温室効果ガスの排出による地球温暖化が問題提起され、人類の化石燃料の利用に関して、警鐘を鳴らしている。IPCCの第4次評価報告書²⁾によれば、

2100年には平均気温が最良推定値で1.8～4°C（最大推計6.4°C）上昇すると予測される。地球温暖化の影響要因としては、「人為的な温室効果ガスの放出、なかでも二酸化炭素やメタンの影響が大きい」とされる。その一方で太陽放射等の自然要因による変化の寄与量は人為的な要因の数%程度でしかなく、自然要因だけでは現在の気温の上昇は説明できないことが指摘されている。一度環境中に増えた二酸化炭素などの長寿命な温室効果ガスは、能動的に固定しない限り、約100年間（5～200年）にわたって地球全体の気候や海水に影響を及ぼし続けるため、今後20～30年以内の対策が温暖化による悪影響の大小を大きく左右することになる。

としており、人類を育む地球環境を保全するためにも、化石燃料使用量の削減は人類の喫緊の課題である。世界全体の部門別のエネルギー消費量に関しては、建築部門が35%を占めている³⁾。更に日本の二酸化炭素排出量の推移をみると建築由来の二酸化炭素排出量の増加が突出している⁴⁾。このように建築部門における省エネルギー・二酸化炭素排出量削減が要請される。

地球温暖化防止への国際的な取り組みとして、1992年の気候変動に関する国際連合枠組条約がある。これは、国際的に、気候変動がもたらすさまざまな悪影響を防止するための取り組みの原則、措置などを定めた国際的な条約である。2015年にCOP21において、「パリ協定」が採択され、以下の内容が盛り込まれた。

- ・ 世界共通の長期目標として2°C目標の設定と1.5°Cに抑える努力をする。
- ・ 主要排出国を含むすべての国が削減目標を5年ごとに提出・更新をする。
- ・ 二国間クレジット制度を含めた市場メカニズムを位置づける
- ・ 適応の長期目標を設定、各国の適応計画プロセスや行動を実施し、適応報告書を提出し、定期的に更新する。
- ・ 先進国が資金の提供を継続することだけでなく、途上国も自主的に資金を提供する。
- ・ すべての国が共通かつ柔軟な方法で実施状況を報告し、レビューを受ける。
- ・ 5年ごとに世界全体の実施状況を確認する仕組みを構築する。

ここで、パリ協定における我が国の目標は、2030年までに、2013年比で、温室効果ガス排出量を26%削減するとしている⁵⁾。

地球温暖化防止のために上記のように省エネルギーの要請が高まる中、我が国ではエネルギー基本計画⁶⁾（2018年7月3日閣議決定）にて「非住宅建築物については、2020年までに国を含めた新築公共建築物等で、2030年までに新築建築物の平均でZEB（ネット・ゼロ・エネルギー・ビル）を実現することを目指す。」としており、より実効性の高い省エネルギー技術への社会的要求がより一層大きくなると考えられる。

政策的な動きとともに、環境（Environment）、社会（Social）、企業統治（Governance）の3つの側面に着目して企業を分析し、優れた経営をしている企業に投資する「ESG投資」が、株式市場で注目を集めている。各側面の評価のポイントは、Environmentでは、エネルギー使用量や二酸化炭素排出量の削減などへの配慮、Socialでは、ダイバーシティやワークライフバランスへの取り組み、Governanceでは、資本効率への意識の高さや情報開示の充実度合である。この概念が、年金など長期資金を運用する機関投資家を中心に世界的潮流となりつつある⁷⁾。Environmentの側面の取り組みが投資家にも評価される素地ができつつあり、今後の省エネルギーへの取り組みがさらに評価され、促進される素地が社会にできつつある。

国際的な動向として、さらに注目されるものとして、2015年の国際連合サミットで採択された「持続可能な開発のための2030アジェンダ」がある。国際連合加盟193か国が2016から2030年の15年間で達成するために掲げた目標、すなわち「持続可能な開発目標（Sustainable Development Goals: SDGs）」を中核とするものである。17の大きな目標と、それらを達成するための具体的な169のターゲットで構成されており、省エネルギーに関連する目標としては「7. エネルギーをみんなにそしてクリーンに」、「13. 気候変動に具体的な対策を」にも掲げられている。我が国においてSDGsを企業で取り組むことが行われてきており、省エネルギーに対する社会的要求がより一層大きくなると考えられる。さらに、「8. 働きがいも経済成長も」や「11. 住み続けられるまちづくりを」など、人の健康や働きやすさへの配慮に関する目標も掲げられている⁸⁾。

「ESG投資」や「SDGs」で注目されるのは、地球環境への負荷を最小限に抑えることを目的にした省エネルギーの必要性がうたわれると同時に、豊かな生活環境を提供することなど、“人”の側面での配慮をしていることである。

これらの政策的な動向とともに、社会の動向として、従業員の健康維持・向上に取り組む「健康経営」の考え方が示されている⁹⁾。また、空気調和・衛生工学会のZEBの定義において、「室内及び室外の環境品質を低下させることなく、負荷抑制、自然エネルギー利用、設備システムの高効率化等により、大幅な省エネルギーを実現したうえで、再生可能エネルギーを導入し、その結果、運用時におけるエネルギーの需要と供給の年間積算収支が概ねゼロもしくはプラスとなる建築物」とあり、省エネルギーの実現と快適性の確保は両立するべきとの考え方を示している¹⁰⁾。一方で、空気調和・衛生工学会の調査によれば、省エネルギーを意識するあまりに快適性を犠牲にする事例が報告されており¹¹⁾、省エネルギーと快適は両立しないという認識を持つ者もいるのが現状であ

第1章 はじめに

る。

こうした背景から、地球環境温暖化防止と働く環境の快適性を提供するために、空気調和工学において、省エネルギーと快適性を兼ね備えた空調システムが必要とされる。近年、天井放射空調システムが省エネルギーと快適性を兼ね備えた空調システムとして注目されてきており、日本国内にも導入例が多くなってきている^{12), 13), 14), 15), 16)}。熱媒を水とした場合の天井放射空調の特徴として、

- ① 空気搬送動力の削減が可能であること
- ② 冷水温度が高くても負荷処理が出来るので、熱源の高効率運転が可能となること
- ③ フリークーリングなどの自然エネルギー利用と親和性が高いこと
- ④ 天井の表面温度を制御し、放射熱伝達を利用して、直接人体、OA 機器発熱を処理するので、ドラフト感が少なく快適であること
- ⑤ 室内温度ムラが小さいこと

があげられ、省エネルギー性と快適性の両面で優れた空調システムである¹⁷⁾。また、鶴飼らによる研究によれば快適性の観点では均質な環境であるゆえに、気流などを個人で選択できるようにすれば、満足度の高い温熱環境を提供できるシステムであるとされており¹⁸⁾、温熱環境への個人差に対応する空調システムとしてのポテンシャルを秘めていると考えられる。

1.2 放射空調システムの分類

本論文で研究対象とする天井放射パネル空調に関して、一般的な放射空調システムの中での位置づけを明確にするために、放射空調システムの分類を示す。放射空調システムに関する分類として以下の5つの分類が放射（輻射）冷暖房協議会により示されている¹⁹⁾。

(1) 表面温度による分類

表面温度により、①低温式（15～45℃）、②高温式（百数十℃）、③赤外線式（200～1000℃）に分類される。Table 1.2.1 にそれぞれの特徴を示す。一般的な居室においては、以下の観点で「①低温式」にて計画されることが多い。

- ・ 暖房のみならず冷房も可能であること
- ・ 安全性
：高温式や赤外式については加熱面が高温となるため、火傷や火事への対策が必要となる。
- ・ 省エネルギー性
：「①低温式」はヒートポンプを熱源として利用可能である温度域である。

Table 1.2.1 表面温度による分類

	冷房	暖房	安全性	省エネ性	適用用途	設備例
① 低温式 (15~45 °C)	○	○	○	○	事務所・住宅	放射パネル式・躯体埋込式・床吹出空調など
② 高温式 (数百°C)	×	○	×	×	住宅	スチームラジエーター・オイルヒーターなど
③ 赤外式 (200~1000 °C)	×	○	×	×	住宅・屋外空間	電気式パネルヒーターなど

第1章 はじめに

(2) 放射面位置による分類

放射面の位置によって、①天井、②床、③壁、④独立式に分類される。Table 1.2.2 にそれぞれの特徴を示す。建築計画と処理すべき熱負荷によって、適切な放射面の位置を決定することが重要となる。居室内の放射面積の確保、冷房時の快適性や冷却時の効率の観点では、「①天井」が適している。

Table 1.2.2 放射面位置による分類

放射面位置	設置面積	冷房時の快適性	適用用途	設備例
① 天井	◎	◎	事務所	放射パネル 躯体埋込式
② 床	◎	△ ：床面を冷却面とする場合、 足元の温度が低下して快適性 が低下する懸念がある	事務所	躯体埋込式 床吹出空調
③ 壁	△	× ：居室内の一部のみ	住宅	放射パネル
④ 独立式	×	× ：居室内の一部のみ	住宅・ アトリウム	放射パネル

(3) 熱媒による分類

熱媒によって①水、②空気、③水・空気併用式に分類される。Table 1.2.3 にそれぞれの特徴を示す。1.1 節でも述べたが、熱媒を「①水」とした場合、以下に挙げるように、省エネルギーや快適性、メンテナンスの観点で優れた点が多い。

- ・ 搬送動力の削減
- ・ 熱源の高効率運転
- ・ 自然エネルギー利用との親和性
- ・ 静穏性に優れること
- ・ メンテナンスコストの低減
： フィルターやファンベルトの交換などがいないため空気搬送と比べて搬送機器のメンテナンスコストが低く抑えることができる

Table 1.2.3 熱媒による分類

熱媒	省エネ性	静穏性	メンテナンス	イニシャルコスト	設備例
① 水	◎	◎	○	×	放射パネル
② 空気	△	△	△	◎	誘因型放射ユニット ²⁰⁾ ・ 膜放射ユニット ²¹⁾ 等
③ 水・空気併用	○	△	△	○	チルドビーム

(4) 水配管の設置位置による分類

熱媒に水を採用する場合において、①パネル方式（裏面の断熱材なし）、②パネル方式（裏面の断熱材あり）、③躯体埋込方式に分類される。Table 1.2.4 にそれぞれの特徴を示す。構造部材との取り合い、メンテナンス（配管劣化時の配管の交換の必要性）、負荷処理能力を鑑みると、我が国においてはパネル方式がより一般的であると考えられる。①、②のパネル方式に関しては、建物仕様によって、採用する方式の有利・不利の考え方が整理されていない状況であるが、放射パネルの負荷処理能力を最大限に利用する場合に関して、「②パネル式（裏面断熱無）」が有利であると考えられる。

Table 1.2.4 水配管位置による分類

水配管位置	主要構造部への影響	メンテナンス	負荷処理能力	設備例
① パネル式 (裏面断熱無)	◎	○	◎	放射パネル
② パネル式 (裏面断熱有)	◎	○	○	〃
③ 埋込方式	× (スラブに打ち込む場合)	×	×	躯体埋込式 内装埋込式

(5) 結露の有無による分類

冷房時の放射パネルの運転方法によって、①結露なし（結露を許容しない：結露非許容）、②結露あり（結露を許容する：結露許容）に分類される。Table 1.2.5 にそれぞれの特徴を示す。「②結露許容」の場合、除湿制御が不要となることなどの利点はあるが、ドレン配管が放射パネル付近に必要となることや、結露面のカビ防止対策など、メンテナンスが必要となることなどの短所がある。また、放射面の位置は壁に限定される。放射面位置を天井とし、パネル方式する場合には、「①結露非許容」とすることが一般的である。この場合、居室の湿度をしっかりと調節すること、冷水温度を居室空気の露点温度以下としないことが重要となる。

Table 1.2.5 結露の有無による分類

結露の有無 (非許容/許容)	除湿制御の 必要性	ドレン配管	メンテ ナンス	適用用途	設備例
① 結露非許容	必要	不要	○	事務所 住宅	放射パネル
② 結露許容	不要	必要	×	住宅	〃

第1章 はじめに

これらの分類に基づき、本論文における研究対象を以下に設定する。ここで定義する放射空調システムを本論文においては「天井放射パネル空調」と称する。

- ・ 表面温度： 低温式（15～25℃）
- ・ 放射面位置：天井面
- ・ 熱媒： 水
- ・ 放射方式： パネル方式（裏面の断熱材なし）
- ・ 結露有無： 結露非許容

なお、表面温度に関しては、低温式でかつ冷房時を想定した範囲としている。これは、一般事務所に関しては、年間を通じて冷房利用が多いことから、天井放射パネル空調の冷房に関して研究の対象とする。

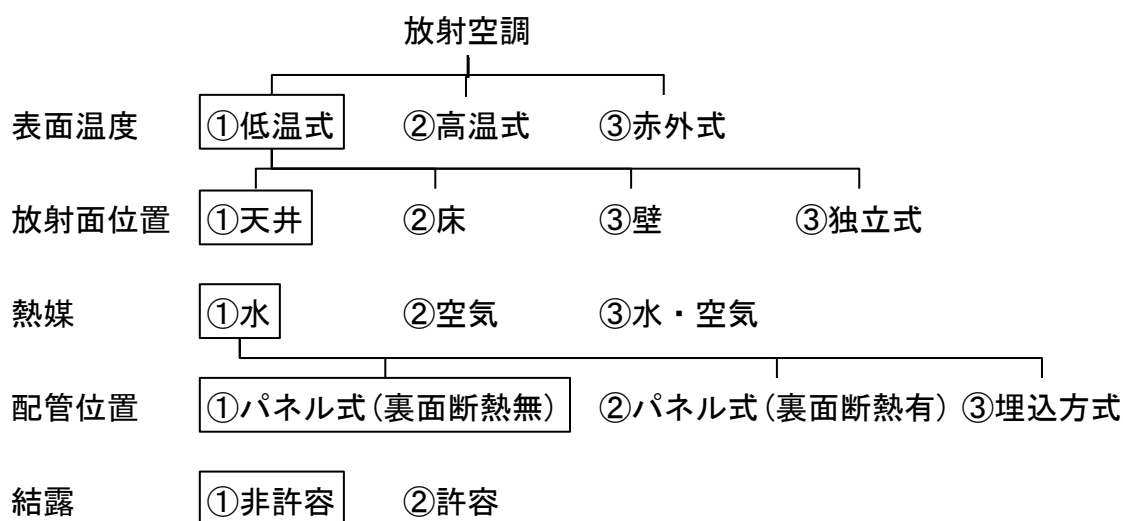


Fig. 1.2.1 本研究で研究対象とする放射空調

1.3 天井放射パネル空調の課題

1.3.1 天井放射パネル空調の普及への課題

本論文で研究の対象とする天井放射パネル空調は省エネルギーと快適性の観点で最先端の建物において、適用されているが、様々な課題があり、普及には至っていない。天井放射パネル空調の課題として以下があげられる^{19), 22)}。

(1) イニシャルコストが高い

天井全体が設備機器となり、放射パネルや固定するための部材が汎用化されていないため、イニシャルコストが高い。また、地震発生時に安全性の確保のために、天井放射パネルをしっかりと固定する必要がある。さらに、以下に挙げる課題のために、確実な施工管理、湿度制御のための設備の追加なども起因して、コストが高くなる。

(2) 水損リスク

配管の継ぎ目・接続部（天井放射パネルと冷水配管，天井放射パネル間の接

続)に施工不良があると、漏水が発生する。また、居室内の湿度や冷水温度の管理が適正に行われていないと、天井放射パネル面に結露が発生するリスクがある。一般的な空調システムでは、漏水や結露などは一部の設備スペースにおいて、フェールセーフ的に対策を行えば、居室における生活や執務を行うにあたっての影響は少ない。天井放射パネル空調の場合、天井全体に天井放射パネルを敷設するため、漏水や結露が発生すると、家具の水損、OA機器の故障、サーバーのデータ欠損など、居室における生活や執務への影響が甚大である。

(3) 湿度制御の必要性

一般対流空調では、顕熱と潜熱を合わせて処理するため、今までは重視されてこなかったが、天井放射パネルは室内の顕熱負荷のみを処理する設備となるため、潜熱負荷を処理する除湿システムが必要となる。除湿システムは、居室内の空気質の確保のための供給外気と室内で発生する潜熱負荷を処理することが求められる。また、上記の水損リスクでの結露対策のために、湿度制御を厳密に行う必要がある。さらに、建築面での外壁の気密性の確保に関しても重要である。高温多湿な隙間風が天井放射パネル面に接触すれば、結露が発生することになる。

(4) 設計手法の未確立

天井放射パネルの所定での条件での性能（負荷処理能力や表面温度、その際の温熱環境など）の把握手法、天井放射パネル空調に即した負荷計算手法、これらを踏まえた設計手法、更に省エネルギー性能の評価手法が確立していない。これらを踏まえて、天井放射パネル空調を適用する際の建物の建築仕様、設備機器との組合せをどのように行うべきかといった設備システムとしての在り方が、整理されていない。現状では、天井放射パネル空調を設計する際には、設計者の経験や知見によるところが大きいと考えられる。

(5) 高負荷への対応

結露対策のために、冷却面の温度は 16°C が下限値となる。そのため、居室空気との温度差が 10°C （室温 26°C を想定）程度となり、 $80\sim 100\text{ W/m}^2$ 程度が天井放射パネルの冷却能力の上限値となる。熱負荷が大きくなるサーバールームや人口密度の高くなるようなコールセンターなどには適さず、採用できない用途がある。また、上記のような用途の居室でなくても、日射負荷が大きくなる窓周りのペリメータ域での天井放射パネル空調の計画に際して、建築と設備計画両面での対策が必要となる。

(6) 応答性の欠如

静穏性に優れたシステムであることが利点としてあげられるが、立ち上がり時の冷却に時間を要すること、気流により冷涼感を得たい執務者への対応といった応答性の欠如に起因する課題がある。

第1章 はじめに

(7) 制御・運用方法の未確立

天井放射パネル空調は、天井放射パネルと外気処理システムが併存するシステムとなり、この二つをどのようにして、協調制御するかが課題である。また、制御指標をどのようなものを採用するかが、課題としてあげられる。

近年の天井放射パネル空調の適用例を鑑みると、(1)の課題は残るものの、(2)、(3)、(5)、(6)に関しては、技術的に解決できる状況になりつつあると考えられる。すなわち、(2)に対しては、厳密な施工管理、(3)に対しては、デシカント空調機をはじめとした除湿システムが開発され、効率的に除湿を行うことができるシステムがそろってきたこと、(5)に対しては、建築的に外部の負荷を遮蔽することと負荷処理能力の高い設備機器と併用すること、(6)の個人の快適性の確保に関しては、パーソナル空調と組み合わせて、気流感を得たいときに執務者が選択できるようにすることで解決できることが示されている²³⁾。天井放射パネル空調の普及に向けて、(1)、(4)、(7)に関して、課題が残っていると考えられる。とりわけ、「(4) 設計手法の未確立」に関しては、これを解決することで、他の課題との波及効果が大きいと考えられる。例えば、「(5) 高負荷への対応」において、建築での対策を検討する際に、計画段階で適正な設計仕様で設計することが可能となる。「(6) 応答性の欠如」に関しては、運転方法の検討が事前に行うことが可能となる。そこで本論文では「(6) 設計手法の未確立」の課題に取り組む。

次節にて、設計手法に関する既往研究の取り組みとその課題を示す。

1.3.2 既往研究での取り組みとその課題

(1) 天井放射パネルの性能の把握

・ 天井放射パネルの負荷処理能力の決定因子について

天井放射パネル空調の設計を行うにあたって、居室における負荷をどのように天井放射パネルにより処理し、どの程度の負荷処理能力を見込むかが、重要な検討項目の一つとなる。天井放射パネルは居室の負荷を処理する設備機器と天井を構成する建築部材の2つの性質を併せ持つ。建築部材の性質上、天井放射パネルに関しては室内空間のデザインによって、敷設条件が異なってくる。Jeong ら²⁴⁾の研究では、パネルの形状や冷水温度、給気条件、室内空気温度、居室内のパネルの位置の計 13 個の因子が天井放射パネルの負荷処理能力に及ぼす影響に関して、感度解析を行っている。これによれば、「居室内のパネルの位置」により、天井放射パネルの負荷処理能力が変化することが示されている。

この研究で示されているように、天井放射パネルの負荷処理能力を決定する因子として、「材料構成」、「形状」、「冷水条件」、「敷設条件」、「熱負荷条件」などが考えられる。「材料構成」に関しては、天井放射パネルに送水する冷水とパネル表面の熱伝導のしやすさが大きく影響する。パネルを構成する材料、配管の種類が考えられる。「形状」に関しては、配管とパネルの固定の方法などが考えられる。「冷水条件」に関しては、天井放射パネルに送水する冷水の温度や流量により、負荷処理能力が異なる。「敷設方法」に関しては、天井放射パネルの建築部材としての性質が表れたものであり、建築計画の違いにより、同一のパ

ネルを採用したとしても、大きく異なってくる。「負荷条件」に関しては、天井放射パネルと発熱源（負荷）位置の関係により、天井放射パネルと負荷との熱交換のメカニズムが変化し、これに応じて天井放射パネルの冷却能力が変化する。例えば、居室の負荷の分布に関しては、天井放射パネルと負荷の表面間の放射熱伝達や負荷からの自然対流などの影響で対流熱伝達現象が変化する。更に天井放射パネルは天井に設置するため、居室と天井裏に接しており、居室側のみならず天井裏側の負荷も考慮する必要がある。天井放射パネルの負荷処理能力の把握を行うにあたって、上記の条件を考慮することが重要である。

・ 試験・実験による天井放射パネルの負荷処理能力の把握について

天井放射パネルの負荷処理能力の把握方法に関して、(1)既往の規格、(2)実験による把握、(3)実建物での検証、の3つに分けて、課題を下記に整理する。

EN14240²⁵⁾や ARCH 2017 CHTRS²⁶⁾において天井放射パネルの負荷処理能力の試験方法が規定されており測定の方法、試験室仕様、疑似負荷の仕様、放射パネルの敷設方法が規定されている。天井放射パネルに送水される冷水温度の平均値と居室空気温度の差からその条件での負荷処理能力を導出することができ、天井放射パネルの負荷処理能力を表す能力線図として広く用いられている。天井放射パネル製造者から販売される様々なパネルの選定を行うにあたって、同一の条件でパネルを比較する際には有用な負荷処理能力の把握方法である。前項で示したように、様々な建築において、天井放射パネルが様々な敷設条件で設置されることが想定されるが、そのため、EN14240や ARCH 2017 CHTRSの規定において示されている試験条件のみでは、当該条件に合わせた敷設条件が想定できず、その条件での天井放射パネルの負荷処理能力が把握できない。そのため EN14240や ARCH 2017 CHTRS に準拠した試験方法で測定された天井放射パネルの能力を参照する場合は、実際の想定される設置条件がその能力に反映されておらず、過大設計や過小設計を招く恐れがあり、注意を要する。

天井放射パネルの負荷処理能力の把握に関する既往の研究に関しては、瀬沼ら²⁷⁾は、実験室において、パネルの対流熱伝達、放射熱伝達、熱伝導を個別に測定することで、放射パネルの伝熱形態の分析を行っている。岡本ら²⁸⁾は実験室において、室温を固定した条件の下で、放射パネルの放熱量の評価を行い、パネルの配管の形状、パネル上部への断熱の有無によるパネルの放熱量への影響の把握を行っている。これらの実験では、実験室空間での天井放射パネルの単体の放熱量の分析にとどまり、実際の敷設条件での確認は行われていない。

塩谷ら²⁹⁾は、実大実験室を構築し、実際の敷設条件での天井放射パネルの放射と対流の熱伝達量の把握を行っている。ただし、ある特定の天井放射パネル、設置条件のみの確認となっている。

空調システムの性能の検証には、実験による方法、実建物における実測による方法がある。新たに空調システムの開発を行う際には、実験にて設計で必要とされる性能が満たされるかどうかを確認し、その空調システムが適用された建物において、実験で得られた性能が満たされているかどうかを検証することが必要とされる。実測による方法については、実験により、天井放射パネルの能力を把握して、建物への適用を行っている例がある^{30), 31), 32), 33)}が、天井放射

第1章 はじめに

パネル空調は国内において適用例が少ないため、天井放射パネルが実際の建物において実験で得られた性能が得られているかどうかの確認を行った例が少ない。

・ 予測モデルによる天井放射パネルの性能の把握について

天井放射パネル空調の設備仕様を決定する際に適正な設備容量で機器を選定するには、天井放射パネルの処理する負荷を正確に見込むことが必要であることは上記にて述べた。天井放射パネル空調を適用した建物における設計の試みとして、実験により、天井放射パネルの能力を把握して、建物への適用を行っている例がある^{30), 31), 32), 33)}。ただし、実建物の適用のたびに敷設条件を実建物の条件にあわせて実験を行うことは現実的ではない。天井放射パネル空調の性能評価を行うためには、実験を経ずして、天井放射パネルの敷設条件を考慮に入れた能力の予測が必要になってくる。

前項でも述べたが、天井放射パネルの負荷処理能力を表示する能力線図として、EN14240やARCH 2017 CHTRSで規定される横軸に室温と冷水温度の平均値の差として、縦軸にパネル処理熱量をプロットしたものがある。室内の空気温度や送水温度を決定し、その条件での処理熱量を参照することができる点で優れたものである。また、同一の条件で天井放射パネルの能力を比較することができる。ただし、想定する条件でのパネル表面温度や流量などは参照することができず、設計に必要な情報を示すのには不十分であると考えられる。

天井放射パネルの能力を予測する試みは国内外において多数の報告がされている。岡本らはパネル各部（パネル面、冷水、配管とパネル接合部）での熱収支式を連立させてパネルの放熱量を予測する方法²⁸⁾、ISO18566-3においてはパネル種別ごとのパネル熱抵抗の算出式が提示され、パネルの表面温度や処理熱量を計算する方法³⁴⁾が提案されている。これらの方法は冷却面の空間側への放熱量と冷媒側（冷水）による処理熱量との熱収支を解く方法である。天井裏と居室を仕切る形で放射パネルが設置される条件において、天井放射パネルにより天井裏の冷却された空気が居室の負荷処理に寄与していると考えられ、これらの既往研究の方法では天井裏空気の影響を考慮することが困難である。天井裏を有するパネル敷設方法への対応は塩谷ら²⁹⁾により示されており、パネル環境温度により天井裏と居室の温度を平均的に扱い、パネル表面とパネル環境温度との熱伝達により、パネルの放熱量をモデル化している。この方法では天井の開口率の大きな条件では、天井裏と居室空気の温度差が小さいため適用可能であるが、密閉性の高い条件では、天井裏と居室空気の温度差が大きくなるため、居室空気温度の扱いに注意を要する。

(2) 天井放射パネル空調に即した負荷計算手法

建築物の熱負荷は、設計時に空調システムの仕様を決定する際の必須の情報であり、熱負荷計算は空調システム設計の根幹となる。我が国においては国土交通省監修の建築設備設計基準³⁵⁾において、熱負荷計算方法が示されているが、従来の対流式空調を前提とした計算手法である。天井放射空調システムの設計手順は示されているものの、天井放射空調に即した負荷計算に関する記述はな

い。天井放射パネル空調は天井表面を冷却するため、居室側への放熱、天井裏側への放熱、そのそれぞれで放射成分と対流成分があり、対流式空調と熱移動形態が大きく異なる。そのため、ここで示される熱負荷計算方法では、天井放射パネル空調の設計を行う際には、適用することができない。

一方で、ASHRAE Handbook³⁶⁾においては、天井放射パネル空調の設計条件を決める手順などが示されている。さらに、放射パネルが放射源として、居室の表面として扱う必要があり、熱負荷計算を行う際は、各居室内表面の熱収支を計算する Heat balance method (以下、HB) を用いる必要があると示唆している。

この指摘に着目して、Feng らは、HB と Radiant time series method (以下、RTS) を比較している³⁷⁾。RTS は、放射による熱取得が遅れを伴って負荷となることを考慮した係数 (Radiant time factor) を導入した応答係数法の一つであり、応答係数法を用いて、天井放射空調の負荷を計算する際には適した手法であると考えられる。実験で得られた熱負荷の経時変化と HB と RTS の計算結果を比較し、HB が精度良く計算が可能であることを示している。さらに、この研究を発展させ、対流空調と天井放射空調の冷房負荷に関する考察を行っている³⁸⁾。ここでは、放射パネル方式 (Radiant cooling panel: RCP)、仕上げ埋込方式 (Embedded surface cooling system: ESCS)、スラブ打込方式 (Thermally active building system: TABS) の3つの代表的な天井放射空調方式を挙げている。それぞれの方式において、対流空調との比較により、負荷の特性の把握を試みており、対流空調よりも、いずれの天井放射空調方式の負荷のほうが大きいことを導いている。ただし、放射パネル方式の設置方法に関しては、パネル上部の空間がない場合に限られている。本論文で定義する「天井放射パネル空調」において、天井裏の影響を考慮に入れていないこれらの研究成果をそのまま適用することはできない。

(3) 天井放射パネル空調に即した設計フロー

天井放射パネル空調の設計を行う際の様々な指針が示されている。例えば、国土交通省の監修の「建築設備設計基準」³⁹⁾においては、以下のような天井放射パネル空調システムの設備仕様を決定するフローを示している。

- ① 熱負荷計算結果から天井放射パネルの仕様を仮に決定
- ② 仮に決定した仕様に基づき温熱環境が基準の範囲内 ($-0.5 \leq PMV \leq 0.5$) にあるかどうかを確認
- ③ 範囲内になれば天井放射パネルの仕様の見直しを行う。
- ④ 範囲内にあれば、天井放射パネルの仕様を決定

ただし、熱負荷計算方法については、既存の一般空調システムを前提とした負荷計算方法が前提となっている。また、天井放射パネルが処理する負荷は、熱負荷計算より得られた熱負荷から、外気処理システムから供給される空気が処理する顕熱量を差し引いた負荷としている。

ASHRAE Handbook⁴⁰⁾や ISO 18566-3³⁴⁾においても、同様に天井放射パネル空調システムの設備仕様を決定するフローを下記のように定めている。

- ① 室内温熱環境条件の設定
- ② 顕熱負荷及び潜熱負荷の計算

第1章 はじめに

- ③ 供給外気の状態の決定
- ④ 供給外気による処理潜熱量の確認
- ⑤ 供給外気による処理顕熱量の確認
- ⑥ ②の顕熱負荷から⑤の処理顕熱量を差し引き、天井放射パネルの処理すべき顕熱負荷を決定
- ⑦ パネル表面温度が結露しないかを確認
- ⑧ パネル以外の壁面と床面の表面温度の決定
- ⑨ パネルの設置面積の決定
- ⑩ 送水温度の決定

ここでも負荷の計算方法については、天井放射パネル空調に即した負荷計算方法は定められていない。

このように、いずれも天井放射パネル空調に即した熱負荷計算方法が明示されていない。既存の指針に従って設計を行う場合、既存の熱負荷計算方法を利用して天井放射パネルの設備仕様を決定することになる。Feng らによれば、負荷計算手法により天井放射パネル空調の負荷計算結果が異なることが示されている³⁸⁾。既往の研究でも明らかなように、負荷計算手法の選定を誤ると適正な設備容量で設計が行えない可能性があり、設計指針の中に天井放射パネル空調に即した熱負荷計算を明確に定義する必要がある。

上記の設計フローにおいては、熱負荷計算は天井放射パネルの設備仕様の決定と別個に行うことが前提となっており、天井放射パネルの設置条件を考慮に入れておらず、適正な設計を行う際には不十分であると考えられる。さらに、⑦のパネル表面温度の確認方法は示されていない。

(4) 省エネルギー性能評価手法

天井放射パネル空調の省エネルギー性能の評価方法に関しては、設計したシステムを目標とする省エネルギー性能を満たすかどうかを判断するために必須である。これに関する研究は国内、海外で多く行われている。

国内においては、省エネルギー基準の適合性を判定するツール⁴¹⁾において天井放射パネルが考慮できるようになっている。ここでは、天井放射パネルの負荷処理能力に関しては、ARCH 2017 CHTRS で規定される試験に基づく性能値を用い、熱負荷は、一般空調を前提とした熱負荷計算手法に基づく計算結果を用いている。このように、上記の課題で示した天井放射パネルの敷設条件などが考慮できず、不十分である。

鈴木らは、実測結果と放射冷暖房評価モデルの計算値の比較を実施している⁴²⁾。しかし、外気処理システムとの併用による検討は行われていない。さらに省エネルギー性能に関する分析がなされていない。

久保木らは、対流式空調と天井放射パネル空調の熱源エネルギー消費量の比較を実施している。天井放射パネル空調に関しては、天井放射パネルの表面温度・パネルの敷設率・補助空調機の負荷配分比をパラメータとして、検討を行っている⁴³⁾。しかし、熱負荷計算に関しては BEST⁴⁴⁾を用いた計算によるものであり、天井放射パネル空調に即した熱負荷計算となっていない。

塩谷らは、天井放射パネル空調を BEST に組込むための方法を示している⁴⁵⁾。

外気処理システムとの組合せの検討などは行われていない。また、外気処理システムとの組合せを検討する際の設計手法に関する提案は行われていない。また、上記 BEST に組み込むための方法を用いて、放射パネルの運用方法に関する検討を行っている⁴⁵⁾。外気処理システムは天井埋込形空冷 PAC と顕熱交換器を組み合わせたシステムを想定している。結露や快適性に関する検討がなされているが、省エネルギー性能に関する検討が行われていない。

松本らは、シミュレーションを用いた設計フローを提案しており、外気処理システムを含めた総合的な設計が行えるような方法を提案している⁴⁷⁾。ただし、設計仕様を決定する際の最大熱負荷に関しては建築設備設計基準³⁹⁾に基づいており、敷設条件を考慮した熱負荷計算を用いていない。

海外においては、Bojic らは、放射面の位置による各種放射空調方式の省エネルギー性能の比較を行っている⁴⁸⁾。ただし、外気処理システムとの組合せによる比較は行われていない。

Sodec らは TRNSYS により、VAV システムと天井放射空調システムとのランニングコストの比較を行っている⁴⁹⁾。外気処理システムとの組合せによる評価を行っているが、空調負荷に関しては VAV システムと天井放射空調システムの負荷が等しいと仮定している。

Bourdakis らは、ASHRAE Standard 140⁵⁰⁾の建築モデルを用いて、躯体蓄熱式放射空調システム (Thermal Active Building System: TABS) と天井放射パネル空調システムに関して、放射空調が処理する熱負荷と空気搬送システムが処理する熱負荷の比率をパラメータとして、設備仕様の比較を行っている⁵¹⁾。ただし、基礎的な検討にとどまり、設計フローの提案には至っていない。

このように、省エネルギー性能を評価する手法は多くの研究で行われている。各研究での着眼点は以下ようになる。

- ① 外気処理システムをどのような組み合わせるか
- ② 一般空調システムとの比較
- ③ 天井放射パネル空調に即した熱負荷計算手法を採用しているか
- ④ どのように設計を行うか

天井放射パネル空調システムにおいても、一般空調システムと同様に、居室の空気質を保つために、外気を供給しなければならないことから、空気搬送を伴う外気供給システムは必須である。設備システムは様々な危機で構成されており、①に関しては、省エネルギーの評価を行う際に必要な検討項目である。②～④に関しては、前述の通りである。これらの着眼点を網羅的に検討した例は少ない。

第1章 はじめに

1.4 本研究の取り組む課題

既往研究での課題を鑑み、天井放射パネル空調を適正な仕様で設計するためのニーズ、すなわち天井放射パネル空調の設計手法の確立に向け、本論文で取り組む課題を下記に示す。

I. 天井放射パネルの処理熱負荷と性能に及ぼす敷設条件の影響の明確化

天井放射パネルが様々な敷設条件で設置されている状況下でどのように熱負荷を処理し、天井放射パネルの性能に影響を与えているかを把握することが必要である。

II. 天井放射パネルの敷設条件を考慮可能とする工学モデルの構築

天井放射パネルの性能や処理する熱負荷を予測するための工学モデルが必要である。工学モデルの求められる要求事項として、天井放射パネルの敷設条件が考慮可能であることである。

III. 敷設条件を入力条件とした天井放射パネルの性能の予測手法の構築

敷設条件や設備条件、室内環境条件を入力として、天井放射パネルの性能を予測する手法が必要である。ここで、様々な敷設条件の考慮にも対応が必要となる。

IV. 敷設条件を考慮した天井放射パネルへの熱負荷の計算手法の構築

建築空間内での天井放射パネルの敷設条件を考慮した熱負荷の計算手法が必要である。ここで、天井放射パネルの敷設条件により変化する天井放射パネルが処理する熱負荷が適正に計算ができることが必要である。

V. 天井放射パネルの性能及び熱負荷計算手法を用いた設計手法の構築

天井放射パネル空調システムの設計に際して、天井放射パネルの性能及び熱負荷予測手法の活用方法を明確化し、設計手法として構築する必要がある。今まで、適正な設備仕様で天井放射パネル空調システムの設計することが可能となる。

VI. 設計した天井放射パネル空調のエネルギー消費量計算手法の構築

空調システムの効率を把握するためには、エネルギー消費量で評価する必要がある。上記の課題を踏まえたエネルギー消費量の計算手法を構築する必要がある。これにより、省エネルギー性能に関する評価も可能となる。

1.5 論文の構成

前節の取り組む課題に対応し、本論文の構成を示す。Fig. 1.5.1 に本論文のフローを示す。「第1章 はじめに」では既往研究の問題点と現在の実務設計上の問題点を整理する。これにより、本論文の位置づけを明確にする。「第2章 実大モックアップを用いた天井放射パネル冷却能力検証実験」では、様々な実験を通して、天井放射パネルの能力把握方法を示し、敷設条件が天井放射パネルの性能や処理熱負荷に及ぼす影響に関して明らかにする。「第3章 適用建物における天井放射パネル冷却能力検証」では、天井放射パネル空調システム適用建物における空調性能検証実験の結果を示し、第3章で示した冷却能力検証実験での天井放射パネルの冷却能力との比較を示し、実験方法の妥当性の検証を試みる。さらに、放熱特性の把握を行う。「第4章 天井放射パネル空調熱収支モデル」では、天井放射パネル空調システムの熱収支式によるモデル化方法と熱収支式の妥当性の検証のための実験について言及する。これは本論文での「第5章 天井放射パネル空調性能予測手法」や「第6章 天井放射パネル空調熱負荷計算手法の提案と熱負荷特性の把握」での空調負荷計算手法の基礎となる工学モデルである。「第7章 設計手法の提案と省エネルギー性能評価」では、第5章、第6章で提案した各計算手法を用いた設計フローを示す。「第8章 おわりに」では、本論文の総括を行い、今後の課題を示す。

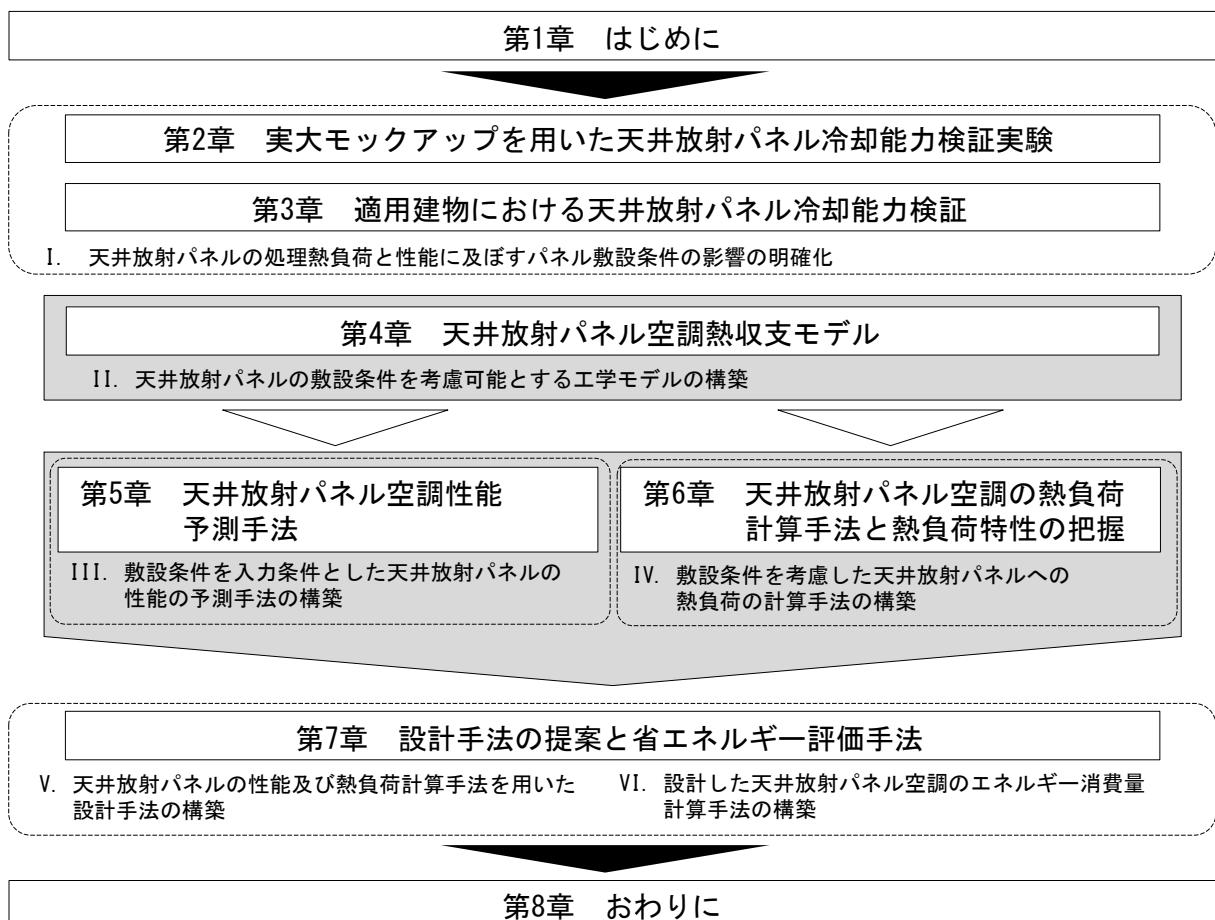


Fig. 1.5.1 研究フロー

第1章 はじめに

参考文献

- 1) 社団法人 日本冷凍空調工業会編：「ヒートポンプ」の実用性能と可能性，日刊工業新聞社，2010.11.1
- 2) IPCC/AR5 WG3: Climate Change 2014 Synthesis Report Summary for 7 Policymakers, 2014
- 3) IEA: Transition to Sustainable Buildings -Strategies and Opportunities to 2050, 2013
- 4) 国立環境研究所：日本の温室効果ガス排出量データ（1990～2017年度）速報値，2018.11.30
- 5) 有馬純：精神論抜きの地球温暖化対策——パリ協定とその後，エネルギーフォーラム，2016.10.27
- 6) 経済産業省，「エネルギー基本計画」，2018.7
- 7) <https://kotobank.jp/word/ESG%E6%8A%95%E8%B3%87-1611233> (accessed 2019.1.2)
- 8) 日本サステナブル投資研究所(JSIL) レポート：ESG投資とSDGsの関係について，2017.7
- 9) 東京商工会議所：「健康経営ハンドブック 2018」，東京商工会議所，2018.7
- 10) 経済産業省 資源エネルギー庁 省エネルギー対策課：「ZEB ロードマップ 検討委員会 とりまとめ」，経済産業省，2015.12
- 11) 空気調和・衛生工学会：我慢しない省エネへ—下記オフィスの冷房に関する提言—報告書，2014.4
- 12) 水出喜太郎，厨まり子，本郷太郎，矢島大督，一ノ瀬雅之，加藤直樹，福留伸高，山田一樹：微気流を併用した放射空調を行うオフィスの温熱環境に関する実験研究 その1 システム概要ならびに模擬空間での冷房実験における室内温熱環境，日本建築学会大会学術講演梗概集，環境工学Ⅱ，pp.1375-1376，2014.9
- 13) 中村駿介，佐々木邦治，小野景子，三木光範，高盈，鄭新源，宗方淳，川瀬貴晴：LED 知的照明システム・輻射空調システムを導入した「低炭素型実証オフィス」の運用実績 その1 施設概要及び輻射空調システムの性能評価，日本建築学会大会学術講演梗概集，環境工学Ⅱ，pp.1071-1072，2010.9
- 14) 桑原亮一，塩谷正樹，大倉 俊雄，大谷 光幸：ゼロエネルギー・ビルを目指した建築設備技術に関する研究 その1 システム概要と放射空調システムの設計計画，日本建築学会大会学術講演梗概集，環境工学Ⅱ，pp.1309-1310，2010.9
- 15) 内田俊平，田子千晶，鄭新源，川瀬 貴晴，中村駿介，安田健一，佐々木邦治：躯体蓄熱併用型輻射空調システムを導入した次世代テナントオフィスビルにおける実測調査 第1報 温熱環境，日本建築学会大会学術講演梗概集，環境工学Ⅱ，pp.1337-1338，2014.9
- 16) 荒井義人，高橋満博，湊敦，川島実，伊藤清，岩谷正道：ZEB を目指した都市型超高層オフィスビルの研究（第1報）建築概要と最先端環境技術によるCO₂排出量削減効果，空気調和・衛生工学会大会 学術講演論文集，pp. 93-96，2013.9

- 17) Jeong, J.W., Mumma, S.A. and Bahnfleth, W.P.: Energy conservation benefits of a dedicated outdoor air system with parallel sensible cooling by ceiling radiant panels, ASHRAE Transactions, vol.109, part 2, pp.627-636, 2003
- 18) 鵜飼真成, 野部達夫: 事務所ビルにおける温熱環境の不均一性に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 第738号, pp.739-746, 2017.8
- 19) 放射(輻射)冷暖房協議会 事務局: 天井放射パネル式放射(輻射)空調の概要と特徴, IBEC, Vol. 39-3, No. 228, 2018.12
- 20) 闫寒月, 斎藤輝幸, 久野覚: 夏期における全空気式誘因放射空調の評価に関する研究, 空気調和・衛生工学会中部支部学術研究発表会論文集, 第14号, pp. 9-12, 2013
- 21) 木幡 悠士, 松田 千怜, 三野 洋介, 宇田川 陽介, 羽山 広文, 全空気式放射空調方式の熱性能に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 第82巻, 第740号, pp. 883-891, 2017.10
- 22) 空気調和・衛生工学会 学会誌委員会: 異見のページ 天井放射冷暖房は日本に定着するか, 空気調和・衛生工学会, 第86巻, 第10号, pp. 943-948, 2012.10
- 23) 荒井義人, 高橋満博他: 清水建設本社の環境設備計画—持続可能な社会に貢献する都市型超高層オフィスの実現—, 空気調和・衛生工学会, 第89巻, 第7号, pp. 569-574, 2015.7
- 24) Jae-Weon Jeong, Stanley A. Mumma: Practical cooling capacity estimation model for a suspended metal ceiling radiant cooling panel, Building and Environment, Volume 42, Issue 9, 2007, pp. 3176-3185
- 25) EN 14240: Ventilation for buildings — Chilled ceilings — Testing and rating, European Committee for Standardization, 2004.
- 26) 放射(輻射)冷暖房協会: ARCH 2017 CHTRS Ver. 1.1 天井放射冷暖房パネル性能試験規格書, 2018.5
- 27) 瀬沼央, 武田仁: 輻射冷暖房パネルの熱特性実験と数値解析, 日本建築学会計画系論文集, No.500, pp.15-21, 1997.10
- 28) 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624号, pp. 221-227, 2008. 2
- 29) 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, No. 683, pp. 31-37, 2013.1
- 30) 水出喜太郎, 本郷太郎, 一ノ瀬雅之, 福留伸高, 厨まり子, 矢島大督, 加藤直樹, 山田一樹: 微気流を併用した放射空調を行うオフィスの温熱環境に関する実験研究 その1 システム概要ならびに模擬空間での冷房実験における室内温熱環境, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学II, pp.1375-1376, 2014.9
- 31) 一ノ瀬雅之, 三浦貴広, 山田一樹, 水出喜太郎, 本郷太郎, 厨まり子, 福留伸高: 微気流を併用した放射空調を行うオフィスの温熱環境に関する実験研究 その2 放射パネルの熱的特性と室内温熱環境, 日本建築学会大会学

第1章 はじめに

- 術講演梗概集，環境工学Ⅱ，pp.1377-1378，2014.9
- 32) 水出喜太郎，本郷太郎，一ノ瀬雅之，木下碧子，倉田佐帆，矢島大督，山田一樹：放射空調を行う都市型環境建築の性能検証（その1）竣工時・運用段階での性能検証概要ならびに微気流併用と温度緩和効果の検証，日本建築学会大会学術講演梗概集，環境工学Ⅱ，pp.1355-1356，2016.8
- 33) 木下碧子，一ノ瀬雅之，山田一樹，水出喜太郎，本郷太郎，矢島大督：放射空調を行う都市型環境建築の性能検証 その6 パネル単体性能測定手法の提案と熱収支の調査，日本建築学会大会学術講演梗概集，環境工学Ⅱ，pp.991-992，2017.8
- 34) ISO 18566-3: Building environment design. Design, test methods and control of hydronic radiant heating and cooling panel systems. Part 3: Design of ceiling mounted radiant panels. International Organization for Standardization, Geneva, 2017
- 35) 「建築設備設計基準 平成27年版」，国土交通省大臣官房官庁営繕部・環境課監修，pp. 337-373
- 36) ASHRAE: ASHRAE Handbook Fundamental SI edition, Ch. 18 Nonresidential cooling and heating load calculation, 2017
- 37) Jingjuan (Dove) Feng, Stefano Schiavon, Fred Bauman, Cooling load differences between radiant and air systems, Energy and Buildings, Volume 65, pp. 310-321, 2013
- 38) Jingjuan (Dove) Feng, Fred Bauman, Stefano Schiavon, Experimental comparison of zone cooling load between radiant and air systems, Energy and Buildings, Volume 84, pp 152-159, 2014
- 39) 「建築設備設計基準 平成27年版」，国土交通省大臣官房官庁営繕部・環境課監修，pp. 497-498
- 40) ASHRAE: ASHRAE Handbook HVAC Systems and Equipment SI edition, Ch. 6 Panel Heating and Cooling, 2016
- 41) 「平成28年省エネルギー基準関係技術資料 エネルギー消費性能計算プログラム（非住宅版）解説 ver.2.4」国土技術政策総合研究所編集・発行，2017.10
- 42) 鈴木 雄介，武政 祐一，塩谷 正樹，加藤 正宏，二階堂 稔，D-32 自然エネルギー利用天井放射冷暖房システムに関する研究：(第1報)天井放射冷暖房システムの実測結果及び性能評価モデルの精度検証，空気調和・衛生工学会大会 学術講演論文集，pp.1135-1138，2010.9
- 43) 久木田 亮子，中村 元，H-53 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. 9
- 44) 郡公子，石野久彌，長井達夫，村上周三：建築総合エネルギーシミュレーションツール BEST のための建築熱シミュレーション法に関する研究，空気調和・衛生工学会論文集，No. 162，pp.9-15，2010.9
- 45) 塩谷 正樹，郡 公子，天井放射パネルユニット熱性能と室内環境の汎用的な

-
- 計算法に関する検討, 日本建築学会環境系論文集, 第79巻 第698号, pp. 331-338, 2014.4
- 46) 塩谷 正樹, 郡 公子, スリットを有する天井放射空調のための汎用熱計算法の検証と冷房解析, 日本建築学会技術報告集, 第20巻 第45号, pp. 633-636, 2014.6
- 47) 松本若菜, 森 太郎, 羽山広文, 菊田弘輝: 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, 日本建築学会環境系論文集 第80巻 第707号, pp. 21-28, 2015.1
- 48) FMilorad Bojic, Dragan Cvetkovic, Ljubisa Bojic: Decreasing energy use and influence to environment by radiant panel heating using different energy sources, Applied Energy, Volume 138, pp. 404-413, 2015
- 49) Franc Sodec: Economic viability of cooling ceiling systems, Energy and Buildings, Volume 30, Issue 2, pp. 195-201, 1999
- 50) ASHRAE Standard 140-2011, Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs. Atlanta, GA: ASHRAE, 2011.
- 51) Eleftherios Bourdakos, Ongun B. Kazanci, Bjarne W. Olesen: Load Calculations of Radiant Cooling Systems for Sizing the Plant, Energy Procedia, Volume 78, pp. 2639-2644, 2015

第2章 実大モックアップを用いた 天井放射パネル冷却能力検証実験

第2章 実大モックアップを用いた天井放射パネル冷却能力検証実験

2.1 既往研究の課題と本章の位置づけ

天井放射パネル空調の設計を行うにあたって、居室における負荷をどのように天井放射パネルにより処理し、どの程度の負荷処理能力を見込むかが、重要な検討項目の一つとなる。天井放射パネルは室内の負荷を処理する設備機器と天井を構成する建築部材の2つの性質を併せ持つ。建築部材の性質上、天井放射パネルに関しては室内空間のデザインによって、敷設条件が異なってくる。

天井放射パネルの負荷処理能力を決定する因子として、「材料構成」、「形状」、「冷水条件」、「敷設条件」、「負荷条件」などが考えられる。「材料構成」に関しては、天井放射パネルに送水する冷水とパネル表面の熱伝導のしやすさが大きく影響する。パネルを構成する材料、配管の種類が考えられる。「形状」に関しては、配管とパネルの固定の方法などが考えられる。「冷水条件」に関しては、天井放射パネルに送水する冷水の温度や流量により、負荷処理能力が異なる。「敷設方法」に関しては、天井放射パネルの建築部材としての性質が表れたものであり、建築計画の違いにより、同一のパネルを採用したとしても、大きく異なってくる。「負荷条件」に関しては、天井放射パネルと発熱源（負荷）位置の関係により、天井放射パネルと負荷との熱交換のメカニズムが変化し、これに応じて天井放射パネルの冷却能力が変化する。例えば、居室の負荷の分布に関しては、天井放射パネルと負荷の表面間の放射熱伝達や負荷からの自然対流などの影響で対流熱伝達現象が変化する。更に天井放射パネルは天井に設置するため、居室と天井裏に接しており、居室側のみならず天井裏側の負荷も考慮する必要がある。天井放射パネルの負荷処理能力の把握を行うにあたって、上記の条件を考慮することが重要である。

EN14240¹⁾や ARCH 2017 CHTRS²⁾において天井放射パネルの負荷処理能力の試験方法が規定されており測定の方法、試験室仕様、疑似負荷の仕様、放射パネルの設置方法が規定されている。天井放射パネルに送水される冷水温度の平均値と居室空気温度の差からその条件での負荷処理能力を導出することができ、天井放射パネルの性能を表す能力線図として広く用いられている。天井放射パネル製造者から販売される様々なパネルの選定にあたって、同一の条件でパネルを比較する際には有用な能力の把握方法である。一方で Jeong ら³⁾の研究では、パネルの形状や冷水温度、給気条件、室内空気温度、居室内のパネルの位置の計 13 個の因子が天井放射パネルの負荷処理能力に及ぼす影響に関して、感度解析を行っており、「居室内のパネルの位置」により、天井放射パネルの負荷処理能力が変化することが示されている。様々な建築において、天井放射パネルが様々な設置条件で設置されることが想定されるが、上記試験規準において示されている試験条件のみでは、正確な天井放射パネルの能力が把握できない。また、これら試験方法で測定された天井放射パネルの能力を参照する場合は、実際の想定される設置条件がその能力に反映されておらず、過大設計や過小設計を招く恐れがあり、注意を要する。

天井放射パネルの能力の把握に関する既往の研究に関しては、瀬沼ら⁴⁾は、実験室において、パネルの対流熱伝達、放射熱伝達、熱伝導を個別に測定することで、放射パネルの伝熱形態の分析を行っている。岡本ら⁵⁾は実験室において、室温を固定した条件の下で、放射パネルの放熱量の評価を行い、パネルの

第2章 実大モックアップを用いた天井放射パネル冷却能力検証実験

配管の形状，パネル上部への断熱の有無によるパネルの放熱量への影響の把握を行っている。これらの実験では，実験室空間での天井放射パネルの単体の放熱量の分析にとどまり，実際の設置条件での確認は行われていない。

塩谷ら⁶⁾は，実大実験室を構築し，実際の設置条件での天井放射パネルの放射と対流の熱伝達量の把握を行っている。ただし，ある特定の天井放射パネル，設置条件のみの確認となっている。

そこで，本研究において，天井放射パネルの負荷処理能力を決定する様々な条件のもと，天井放射パネルの冷却能力に各条件が及ぼす影響について明らかにする実験を行った。形状の異なる2種類のパネルを対象に実際の設置条件を模擬した実験施設において，下記の天井放射パネルの冷却能力検証実験を行った。

2.2 節の「高敷設条件での天井放射パネルの冷却能力検証実験」では，無数の細孔を有するインテリア天井放射パネルとフィン形状としたペリメータチルドビームによる天井放射空調システムの冷却能力検証実験について述べる。ここで述べる実験では，(1) 2種類の天井放射パネルの冷却能力の把握，(2) 外気処理システムを含めた天井放射空調システムの負荷処理状況の把握を目的とした実験を行った。あわせて，インテリア天井放射パネルに関しては，天井の開口率が天井放射パネルの冷却能力に及ぼす影響を明らかにする実験を行った。

2.3 節の「様々な設置条件での高開口率の天井放射パネルの冷却能力検証実験」では，冷却能力向上と材料削減によるコストダウンを意図したスリットがある天井放射パネルの冷却能力検証実験について述べる。ここで述べる実験では，(1) 模擬負荷の位置，(2) 天井放射パネル以外の天井材の仕上げの条件，(3) 試験室の大きさが天井放射パネルの冷却能力に及ぼす影響を明らかにする実験を行った。

第2章 実大モックアップを用いた天井放射パネル冷却能力検証実験

2.2 高敷設率条件での天井放射パネルの性能検証実験

無数の細孔を有するインテリア天井放射パネル（以下、インテリアパネル Fig. 2.2.1）とフィン形状としたペリメータチルドビーム（以下、チルドビーム Fig. 2.2.2）による天井放射空調システムの冷却能力検証実験について述べる。

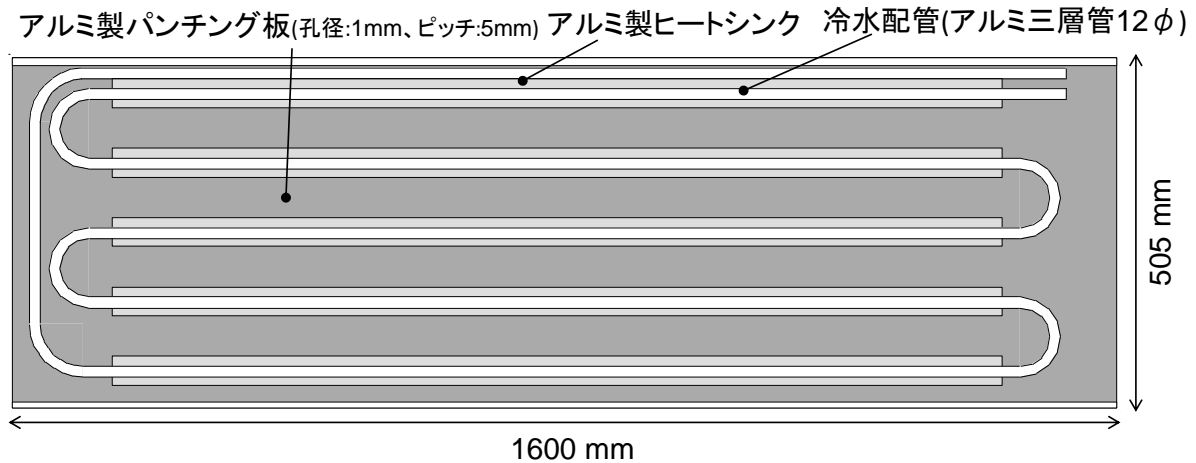


Fig. 2.2.1 インテリア天井放射パネル

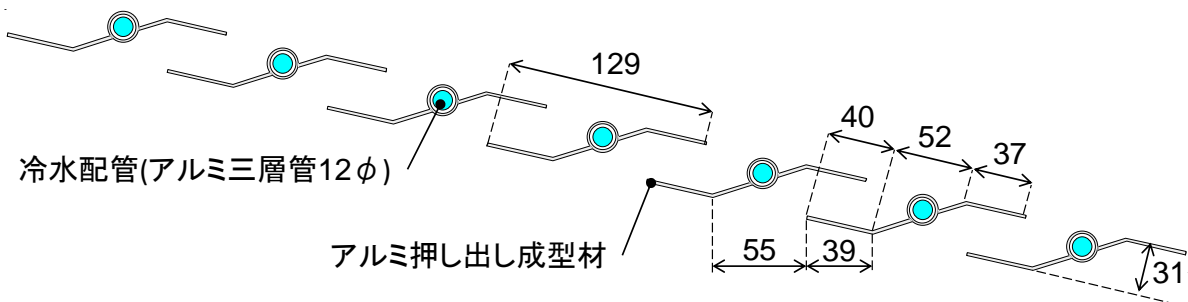


Fig. 2.2.2 ペリメータチルドビーム

2.2.1 実験施設仕様

実験室は Fig. 2.2.3 に示すように事務所仕様の内装を施した約 66m^2 の試験室と全面ガラス窓によって区画された外気室で構成される。試験室に対し所定の負荷を与えることで、試験室の空調システムの評価ができ、ペリメータ負荷は外気室内の日射を模擬したハロゲン灯（太陽灯）の出力を調整することで与えられる。実験室の周囲には試験室と同等の温度に維持できるように別途空調機を配置し、周囲からの熱ロスを最小限に抑えるようにしている。また、実験室の外周はポリスチレンフォーム系断熱材により断熱し、断熱材の厚みをそれぞれ天井は 150mm 、壁は 100mm 、床は 100mm としている。床は更に断熱材の上に保護コンクリート（厚み 150mm ）打設している。

試験室内の天井には、インテリア部はインテリアパネル（Fig. 2.2.1）、ペリメータ部はチルドビーム（Fig. 2.2.2）が設置されている。Fig. 2.2.3 の点線太枠に示されるように放射パネルは1系統当り複数枚連結され、矢印に示すように冷水を送水する。チルドビームは1系統当り複数枚数連結され、インテリアパネ

第2章 実大モックアップを用いた天井放射パネル冷却能力検証実験

ルと同様に矢印に示すように冷水を送水する。Fig. 2.2.4 に示すように、パネルに送水される冷水はインテリア系統、ペリメータ系統それぞれで流量と送水温度が設定可能である。

床はOAフロアとし、その床面にはインテリア部はパーソナル吹出し口、ペリメータ部にはライン状吹出し口による床吹出し空調とし、給気温度と風量の設定の変更が可能である。還気方式は、インテリアパネル冷却能力確認実験の時はインテリア天井裏に設けた還気口（天井レタンチャンバー方式）を用い、インテリア・ペリメータ負荷処理確認時はブラインドボックスに設けた開口部の還気口（ブラインドボックス吸込み口）を用いた。

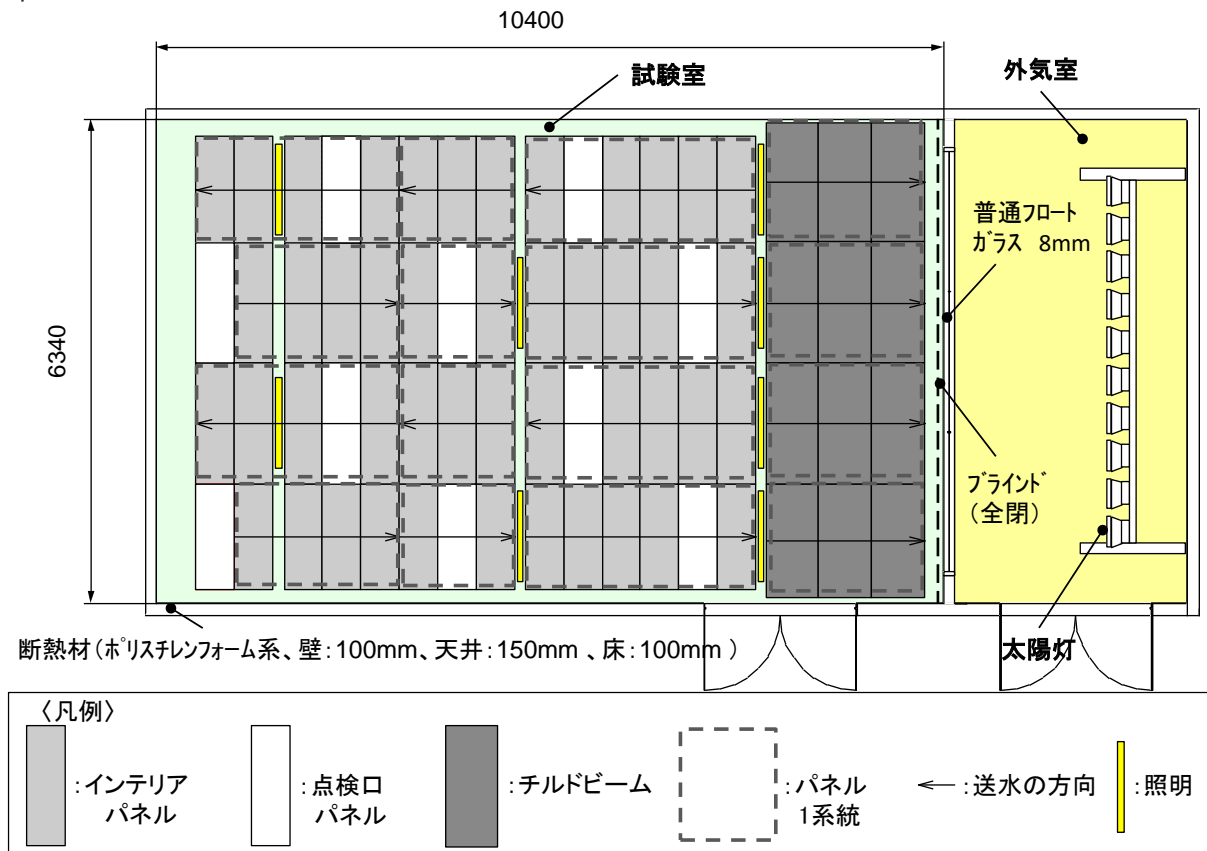


Fig. 2.2.1 実験室平面図

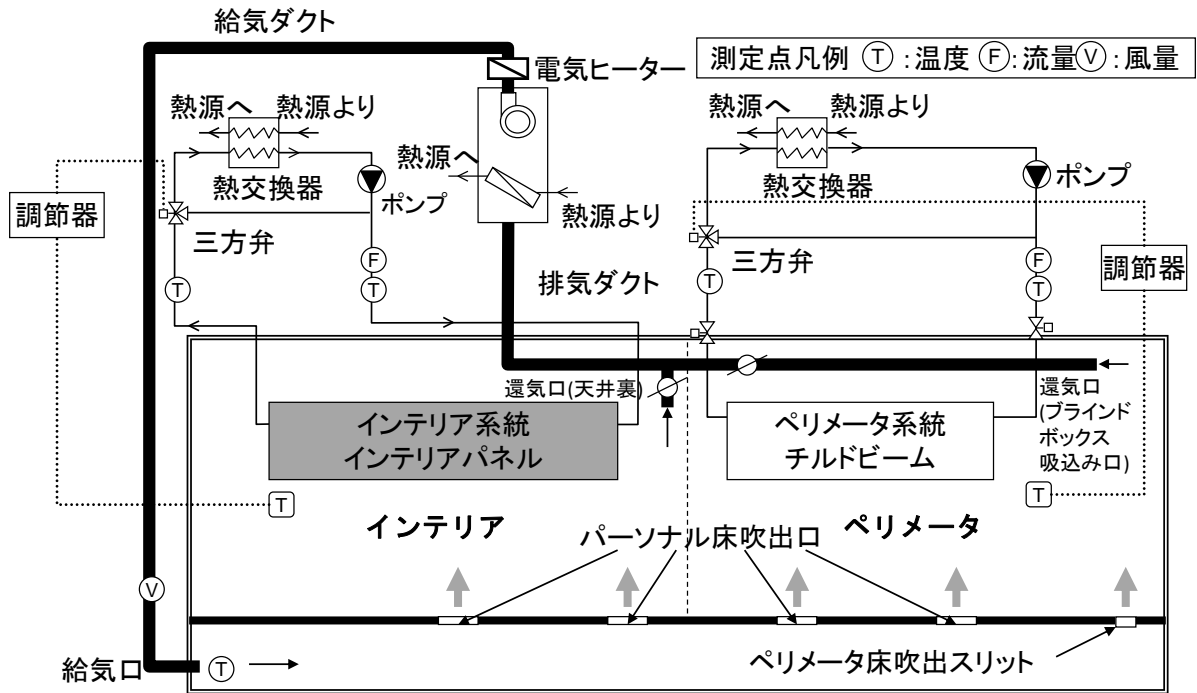


Fig. 2.2.4 実験設備システム及び測定点

2.2.2 測定方法

Table 2.2.1 に測定項目を示す。実験設備システム及び実験室各所に測定機器を配置し、温度、風速、日射負荷を測定した。

Fig. 2.2.4 に実験設備システムと、その設備機器周りの測定点を示す。放射パネルの送水・還水温度と送水流量、空調機の給気・還気温度及びダクト内風速等を測定し、放射パネル及び空調機での処理熱量を算出した。

Fig. 2.2.5 に模擬負荷、床吹出口の配置を示す。照明発熱は実際の照明により与え、機器発熱はアルミニウムカバーにより覆われた電球により模擬した。発熱量は電圧調節器により調整し、電力量計により測定した。

Fig. 2.2.6 に温度・気流の測定点の配置を示す。温度測定点により、室内の空気温度分布、インテリアパネル表面温度分布を測定した。また、室内の気流速度は 0.1m/s 程度であり、気流環境として静穏な環境であることを全実験において確認している。その他、試験室の外部の温度、放射収支計によって窓面を通した太陽灯からの放射熱量を測定し、実験室外部からの熱授受を算出した。

Table 2.2.1 測定項目

測定項目	測定機器 [型番(メーカー)]	測定点
送水温度	T型熱電対 シース型	各系統往還：4
送水流量	電磁流量計 [MGM1010(東京計装)]	各系統：2
表面温度	T型熱電対 0.32mmφ単線	天井放射パネル：20 チルドビーム：6 壁面・床面：34 ガラス面：12
空気温度	T型熱電対 0.2mmφ7本撚線	環境試験室内：55 外気室内：6 環境試験室周囲：6 ダクト内：7
風速	熱線風速計 [1550, 0964-01(日本カノマックス)]	環境試験室内：3 ダクト内：7
日射負荷	放射収支計[CNR2(Kipp&Zonen)]	ガラス-ブラインド間:1点

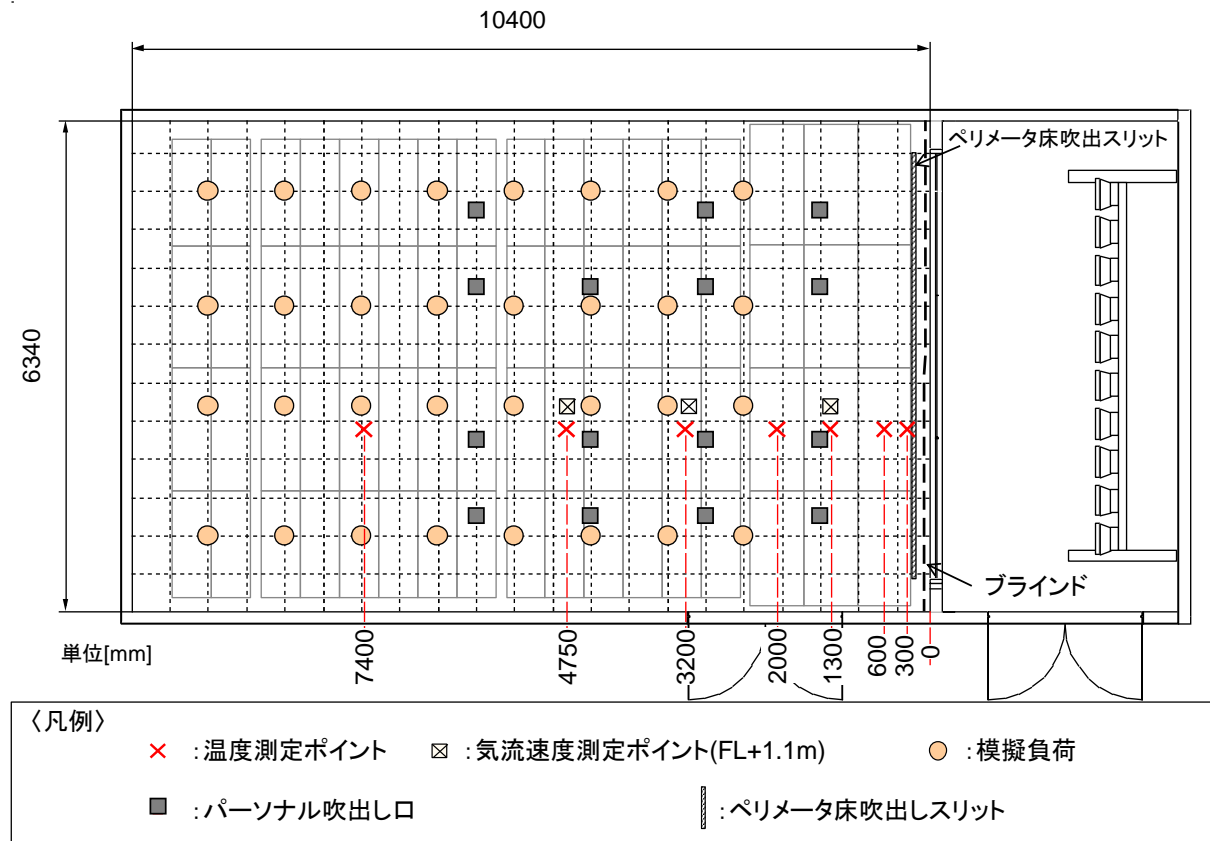


Fig. 2.2.5 模擬負荷・床吹き出し口・測定点配置図

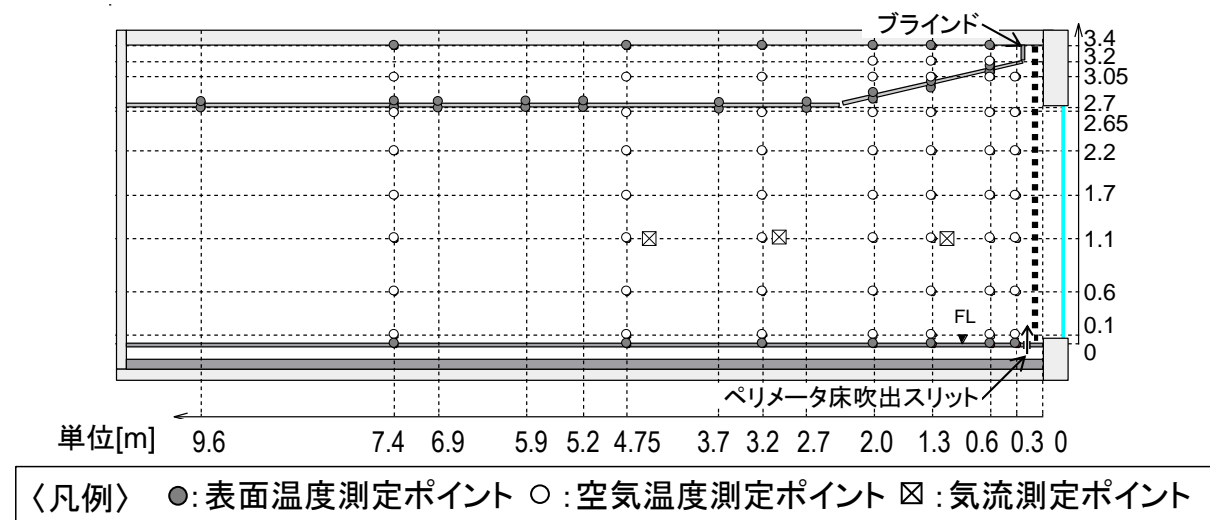


Fig. 2.2.6 温度・気流測定点断面配置図

2.2.3 実験条件

Table 2.2.2 及び Table 2.2.3 に実験条件を示す。下記に示す3つに着目した実験を行った。

(1) インテリアパネル冷却能力確認実験

照明負荷と設備機器運転条件（冷水温度，流量）を固定として，室温を 26°C となるように機器発熱を調整した。Table 2.2.2 に示す室内発熱量は調整した結果である。実験パターンはNo. 1～6を設定した。給気無（No. 1～3）と給気有（No. 4～6）の比較することで給気の有無の冷却能力への影響を把握する。給気無と給気有のパターンでそれぞれ送水温度の平均値の冷却能力への影響の把握のために流量を3パターン（0.3, 0.6, 0.9 $\text{l}/\text{min}\cdot\text{m}^2$ ）設定した。給気有の時の還気方式は天井レタンチャンバー方式とした。

(2) インテリア・ペリメータ負荷処理確認実験

室内発熱負荷条件（ $60\text{ W}/\text{m}^2$ ），想定建物における外部負荷条件（夏期ピーク条件（西面における屋外鉛直面日射量： $420\text{ W}/\text{m}^2$ ，外気温度： 32°C ））と設備機器運転条件を固定とし，室内温度分布と各設備機器の処理熱量を確認した。給気温度を 26°C （No.7）， 23°C （No.8）の2パターンを設定し，給気温度の違いによる各機器の処理熱量の内訳への影響を見た。還気はブラインドボックスの還気口によって行い，給気風量は $920\text{ m}^3/\text{h}$ に設定した。

(3) 天井開口率影響確認実験

天井の開口率が天井放射パネルの冷却能力に及ぼす影響を明らかにするために，室温や流量の条件などは「(1) インテリアパネル冷却能力確認実験」と同様として，No. 9～20の実験を行った。Fig. 2.2.7 に示すように，天井の開口率と給気に着目して設定した。No.9～11（Case 1）は天井裏と居室との開口率が低いパターンである。天井裏のパネルとチルドビームの間を区画し，チルドビーム部を天井の開口として寄与させないことで開口率（床面積あたり）の低いパターンとし，実際に計算された開口率は1.4%であった。No.12～14（Case 2）は天井裏の区画を外し，チルドビーム部を天井の開口として寄与させ，天井の開口率を高くしたパターンとし，実際に計算された開口率は13.1%である。

更に給気の影響の把握のために，給気を行う条件下でNo.15～17（Case 3）は開口率低い条件，No.18～20（Case 4，「(1) インテリアパネル冷却能力確認実験」におけるNo. 4～6に対応）は開口率が高い条件として設定とした。

第2章 実大モックアップを用いた天井放射パネル冷却能力検証実験

Table 2.2.2 実験条件（負荷条件・室温条件）

実験目的	No.	室内発熱負荷			ペリメータ 負荷 [W]	インテリア 代表点室温 ^{※3} [°C]
		総計 [W]	内訳			
			照明 ^{※1} [W/m ²]	OA 機器 ^{※2} [W/m ²]		
①インテリアパネル冷却能力確認	1.	2279	6.0	36.0		26.0
	2.	2657		44.0		
	3.	2826		47.0		
	4.	1992		31.0		
	5.	2166		34.0		
	6.	2290		37.0		
②インテリア・ペリメータ負荷処理確認	7.	3080		53.0	2870	成行 (目標 26.0)
	8.	3127		54.0	2840	
③天井開口の影響確認	9.	2282		44.7		26.0
	10.	2599		51.0		
	11.	2699		52.9		
	12.	2279		44.7		
	13.	2657		52.1		
	14.	2826		55.4		
	15.	1552		30.4		
	16.	1721		33.7		
	17.	1818		35.6		
	18. (4.)	1992		39.1		
	19. (5.)	2166		42.5		
	20. (6.)	2290		44.9		

※1: 照明負荷密度は室内全体(インテリア部: 51 m², ペリメータ部: 15 m²)での密度として計算している。

※2: 室内発熱負荷密度はインテリア部(51 m²)での密度として計算している。

※3: インテリア代表室温は窓から 4.75m かつ床上 1.1m の測定点における空気温度とした。

第2章 実大モックアップを用いた天井放射パネル冷却能力検証実験

Table 2.2.3 実験条件（機器運転パターン）

実験目的	No.	インテリアパネル運転条件		チルドビーム運転条件		空調機運転条件						
		送水温度 [°C]	流量※1 [l/min·m ²]	送水温度 [°C]	流量※2 [l/min·m ²]	給気温度 [°C]	風量 [m ³ /h]	還気口位置				
①インテリアパネル冷却能力確認	1.	16.0	0.3	/	/	/	/	/				
	2.		0.6									
	3.		0.9									
	4.		0.3									
	5.		0.6									
	6.		0.9									
②インテリア・ペリメータ負荷処理確認	7.		0.6	16.0	1.5	/	26.0	660	インテリア天井裏			
	8.		0.6							23.0	920	ブラインドボックス
③天井開口の影響確認	9.		0.3	/	/	/	/	/	/			
	10.		0.6									
	11.		0.9									
	12.		0.3									
	13.		0.6									
	14.		0.9									
	15.		0.3							26.0	660	インテリア天井裏
	16.		0.6									
	17.		0.9									
	18. (4.)		0.3									
	19. (5.)		0.6									
	20. (6.)		0.9									

※1: インテリアパネルの総面積(35 m²)当りの流量として計算している。

※2: チルドビームの床面への見付総面積(13 m²)当りの流量として計算している。

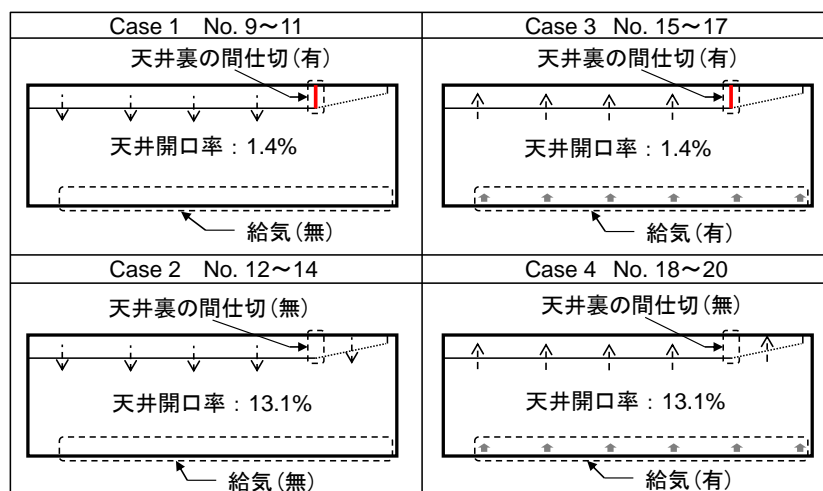


Fig. 2.2.7 天井開口影響率確認実験のパターン

2.2.4 実験結果

2.2.4.1 インテリアパネル冷却能力確認実験

(1)鉛直温度分布

Fig. 2.2.8 に送水流量 $0.6 \text{ l/min}\cdot\text{m}^2$ ，床吹き出し口からの給気無と給気有の場合の鉛直空気温度を示す (No. 2, 5)。室温が定常となった時点での測定値を実験結果として示す (以下，他の実験結果についても同様である)。居室側 (FL+0.1~2.65m) ではいずれも上下の温度差が小さく (いずれの場合も 0.5°C 以内)，平面的にも温度差が小さい。窓から 2m の位置での天井裏 (FL+2.7~3.4m) で，給気無では室温に比べて 2.5°C 程度の低下がみられるが，給気有では見られない。また，窓から 7.4m, 4.75m の天井裏 (FL+3.05m) で給気無の方が，給気有よりも 1.0°C 程度低い。給気有では還気がチルドビームの隙間を通過するため，ほぼ居室の空気温度となっているが，給気無ではインテリアパネルにより冷却された天井裏の空気がチルドビーム部の隙間から下降していると推測される。

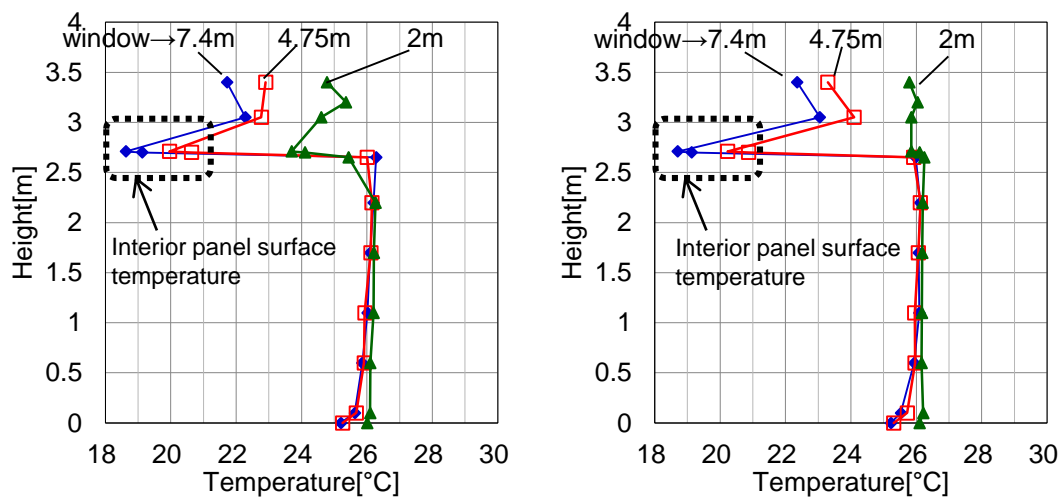


Fig. 2.2.8 流量 0.6 l/min 時の鉛直温度分布
(左：給気なし，右：給気あり)

(2)冷却能力

EN14240¹⁾を参考にして、インテリアパネルの処理熱量を縦軸に、室温と送水温度の平均値（往還冷水温度の平均）の差を横軸にプロットした散布図を Fig. 2.2.9 に示す。このような線図により冷水温度・室温と処理熱量の関係を把握することができ、天井放射空調においてある設計条件を満たすための熱源の仕様と容量、天井放射パネルの必要敷設面積を決定することができる。また、これにより後述するチルドビーム等の異種の放射天井パネルとの冷却能力の比較が行える。

インテリアパネルについては給気有と無でそれぞれ流量条件において処理熱量が概ね一次関数上にのっている。回帰式から処理能力を比較すると給気有が無に比べて6%程度、除去熱量が大きいことが示されている。Fig. 2.2.8 で示される通り、給気有としたことでインテリアパネルの周囲空気温度(主に天井裏)が高くなり、パネルの熱交換量が増えたことが原因と考えられる。

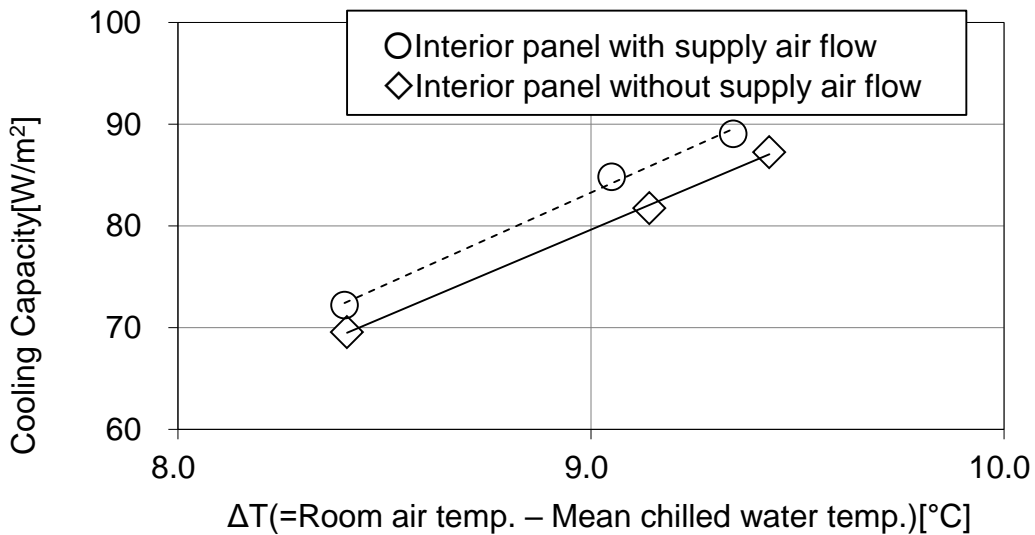


Fig. 2.2.9 インテリアパネル冷却能力

第2章 実大モックアップを用いた天井放射パネル冷却能力検証実験

2.2.4.2 インテリア・ペリメータ負荷処理確認実験

(1)鉛直温度分布

Fig. 2.2.10 と Fig. 2.2.11 にそれぞれ給気温度 26°C、23°C の時の鉛直空気温度分布を示す。各測定結果ともにインテリア部（窓から 3.2~7.4m）とペリメータ部（窓から 0.6~2m）の温度差が見られない。また、窓から 0.6m において窓付近上部（FL+3m）では、太陽灯からの放射熱の影響で居住域よりも 1.5°C 高くなっていると考えられるが、窓付近上部以下では、その他の測定点とほぼ等しくなっている。これはチルドビームとペリメータ床吹出しスリットの効果によるものと考えられる。

給気温度 26°C の時よりも 23°C の時は、給気温度を低くすることで負荷処理された結果、室温が約 1.0°C 低く、これに伴い、パネルの表面温度も約 0.5°C 低くなっている。

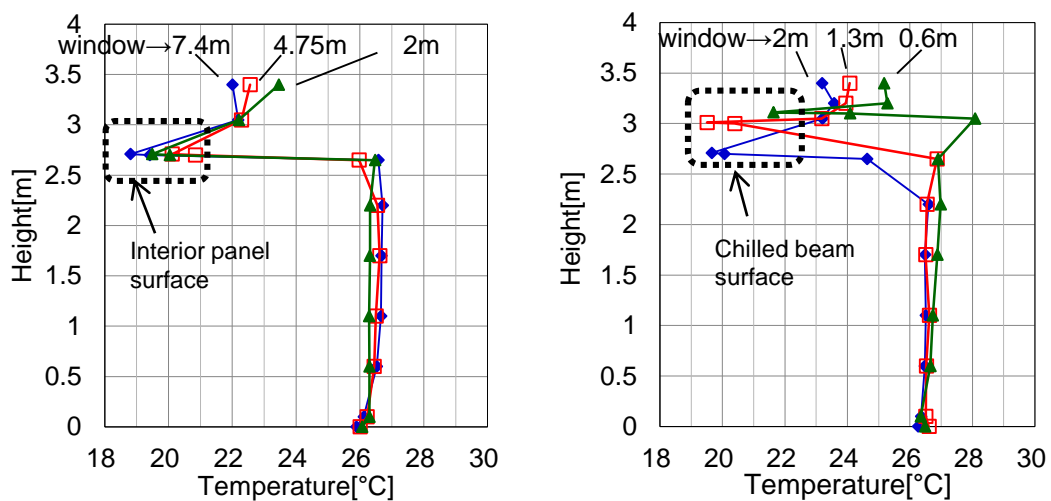


Fig. 2.2.10 インテリア-ペリメータ同時運転時(26°C 給気)
鉛直温度分布(左：インテリア，右：ペリメータ)

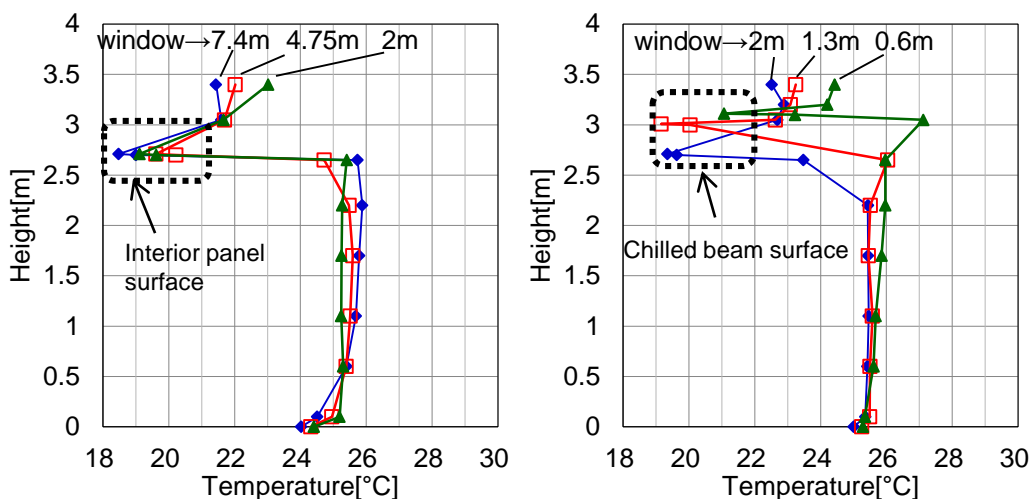


Fig. 2.2.11 インテリア-ペリメータ同時運転時(23°C 給気)
鉛直温度分布(左：インテリア，右：ペリメータ)

(2)各機器の処理熱量

Fig. 2.2.12 に No. 7: 26°C 給気, No. 8: 23°C 給気の負荷と各設備機器処理熱量の熱収支を示す。冷房負荷に対する除去熱量の割合は, 26°C 給気で 94%, 23°C 給気で 104%となっており, ほぼ熱収支のバランスがとれていると考えられる。ペリメータ負荷に対するチルドビームの除去熱量の割合は, 26°C 給気で 64%, 23°C 給気で 58%となっており, その残り (26°C 給気時で 36%, 23°C 給気時で 42%) が空調機により処理されていると考えられる。26°C 給気でも空調機処理熱量が大きいのは, ブラインドボックス吸込み口により日射からの熱気を効果的に処理していることが寄与していると考えられ, No. 7 (26°C 給気時) と No.8 (23°C 給気時) 共にペリメータ負荷は, 空調機とチルドビームの併用により処理している。この結果より, 各機器が想定負荷を処理し, 相互の干渉なく負荷処理に寄与していることが分かる。

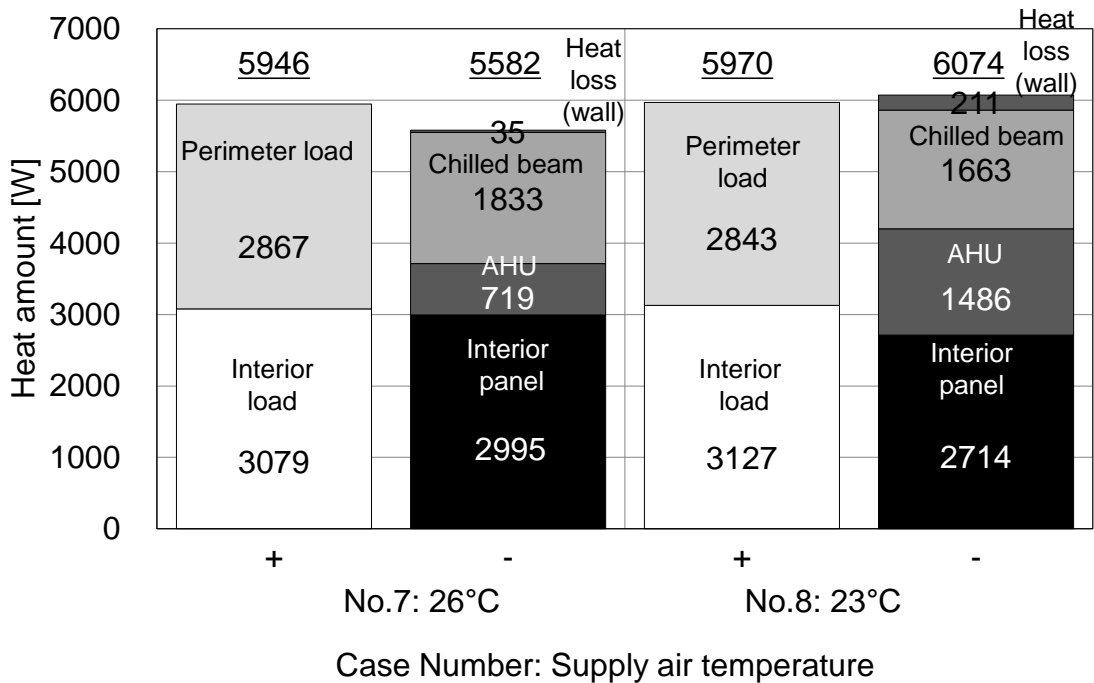


Fig. 2.2.12 各機器熱収支計算結果
(インテリアパネル-チルドビーム同時運転時)

(3) インテリアパネル・チルドビーム冷却能力

2.2.4.1 (2)項と同様にして、チルドビーム冷却能力を EN14240 に基づく能力線図にプロットしたものを Fig. 2.2.13 に示す。インテリアパネルとチルドビームが同時に運転した時のインテリアパネルの処理熱量はインテリアパネルのみを運転した給気無の値に近い。これは還気口の位置をブラインドボックス吸込口としており、給気とインテリアパネルとの対流熱交換が小さいためであると考えられる。

チルドビームの処理熱量については室温と送水温度平均値の差（横軸の値）が 9℃ で、実験結果から外挿により算出すると 121 W/m² となる。これに対し、インテリアパネルの処理熱量が 80~84 W/m² となっており、チルドビームの方がインテリアパネルよりも約 1.5 倍処理熱量が大きいことが分かる。実験室にて行った気流可視化実験時の画像（Fig. 2.2.14）で示すようにフィン形状にすることで自然対流を促進させたことの効果が見られる。

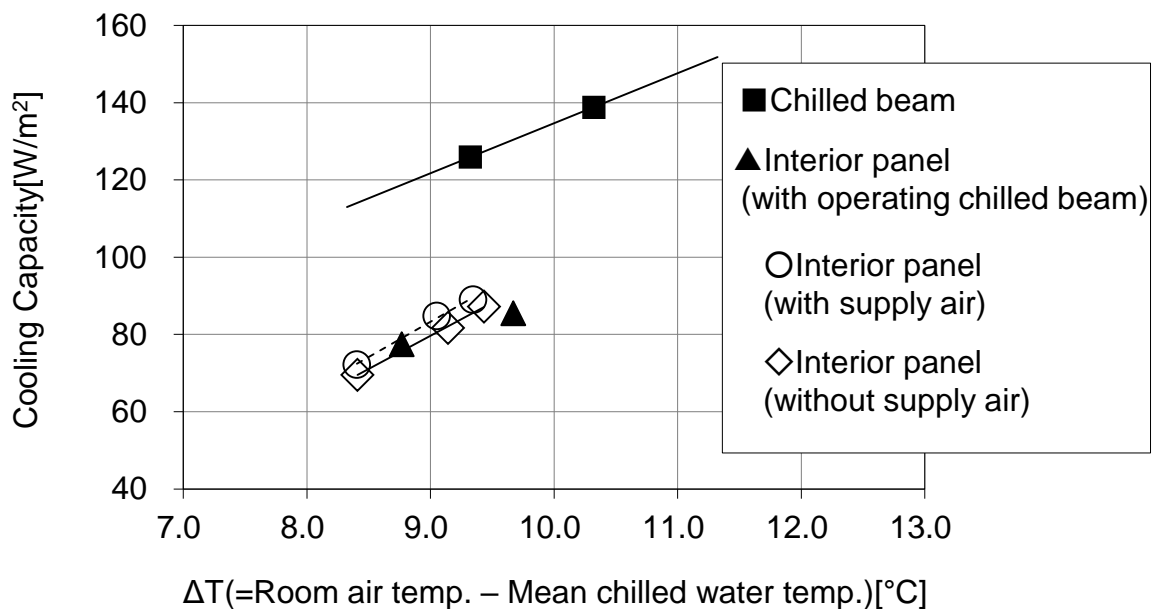


Fig. 2.2.13 ペリメータチルドビームとインテリア放射パネルの冷却能力

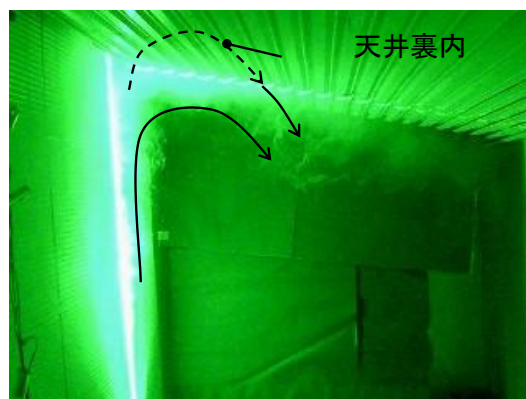


Fig. 2.2.14 ペリメータチルドビーム 気流可視化実験画像

2.2.4.3 天井開口率影響確認実験

(1)鉛直温度分布

Fig. 2.2.15 に各パターンの流量を 30 L/min とした場合の試験室中央部（窓より 4.75m）での鉛直温度分布を示す。各パターンで室内の上下温度分布に差異はないが、天井の開口率が高い方が天井裏の空気温度が高く（Case 1<2, Case 3<4）、給気を有とした場合の方が天井裏の空気が高く（Case 1<3, Case 2<4）なっており、天井裏と居室の空気の循環量に起因すると考えられる。ここで開口率が高く、給気が行われると、天井裏と居室の空気の循環量が大きくなり、天井裏の空気が室温に近づくという現象が起きていると考えられる。ただし、循環量（給気風量）が等しい Case 3 と 4 の温度差はこの要因で説明することができない。これは給気経路が Case 3 ではパネル細孔のみを経由している一方で、Case 4 に関しては給気の経路は通気抵抗が小さいチルドビーム側へ給気が通過し、パネル細孔を経由する給気風量が Case 3 の方が小さいと考えられる。これにより Case 4 と比べて Case 3 の方がパネルと給気との熱交換量が大きくなったと考えられる。（更にパネルと給気の熱交換量が Case 4 よりも Case 3 の方が大きい証拠としてパネル表面温度が Case 3 の方が高くなっている。）以上の要因で天井裏の空気温度が Case 3 の方が Case 4 よりも低くなったと考えられる。

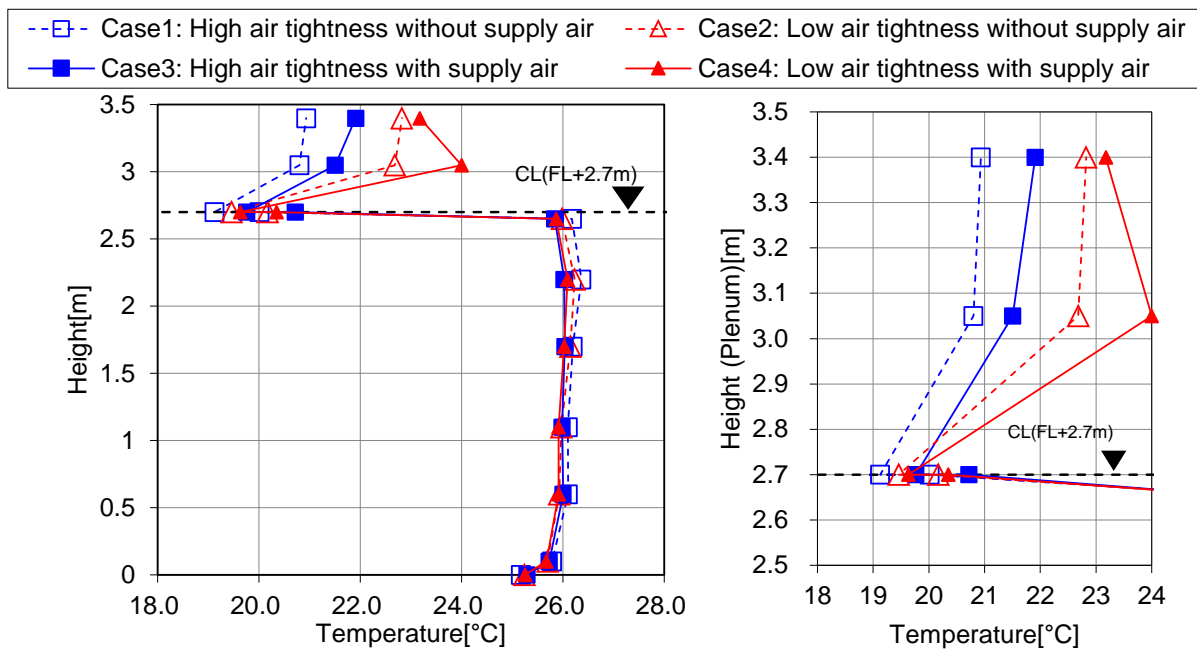


Fig. 2.2.15 鉛直温度分布（インテリア部）

(2)熱収支の分析

Fig. 2.2.16 にパネル処理熱量と室内発熱量と空調機による処理熱量，実験室外部からの熱貫流量（熱ロス）の収支バランスを示す。各パターン共に送水流量 30L/min での結果を示す。各パターンで除去側（-）と加熱側（+）で収支バランスが取れている。給気無のパターン（Case 1 と 2）では処理熱量，室内発熱量ともに天井の開口率が高いパターンで大きい。給気有のパターン（Case 3 と 4）では，空調機の給気が負荷として室内の熱収支に寄与している。これは放射パネルにより冷却された天井裏の空気を還気として空調機に取り入れられたことが原因で，還気温度（20～24℃）が給気温度（26℃）よりも低くなったため，空調機が加熱側に働いていたためである。Case 3 の方で空調機処理熱量が大きく，2.2.4.3(1)項でも述べたように給気とパネルの熱交換量が大きいためと考えられる。天井放射パネルと空調機を組み合わせる際に管機構の位置をどのように配置していくかが，課題となることが示唆される。

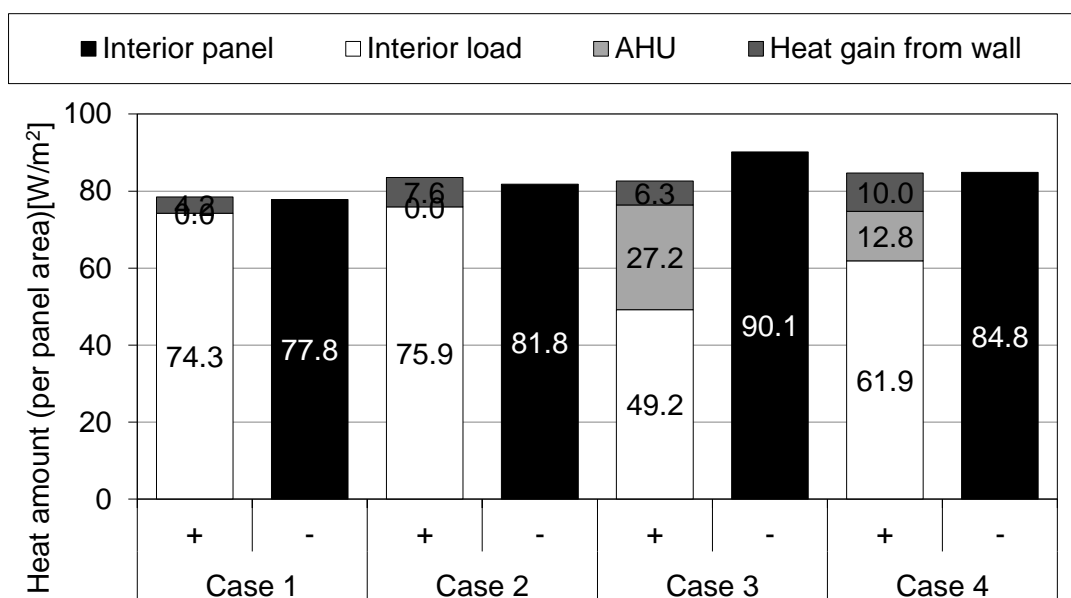


Fig. 2.2.16 熱収支の分析結果

(3)冷却能力

EN14240 に準拠して，インテリアパネルの処理熱量を縦軸に，室温と送水温度の平均値（往還冷水温度の平均）の差を横軸にプロットした散布図を Fig. 2.2.17 に示す。給気無のパターンにおいて，天井の気密性を低くした方で除去熱量が高い傾向を示している。給気有のパターンにおいて，気密性を高くした方で除去熱量が高い傾向を示しているが，給気との熱交換で除去熱量が大きくなっている。

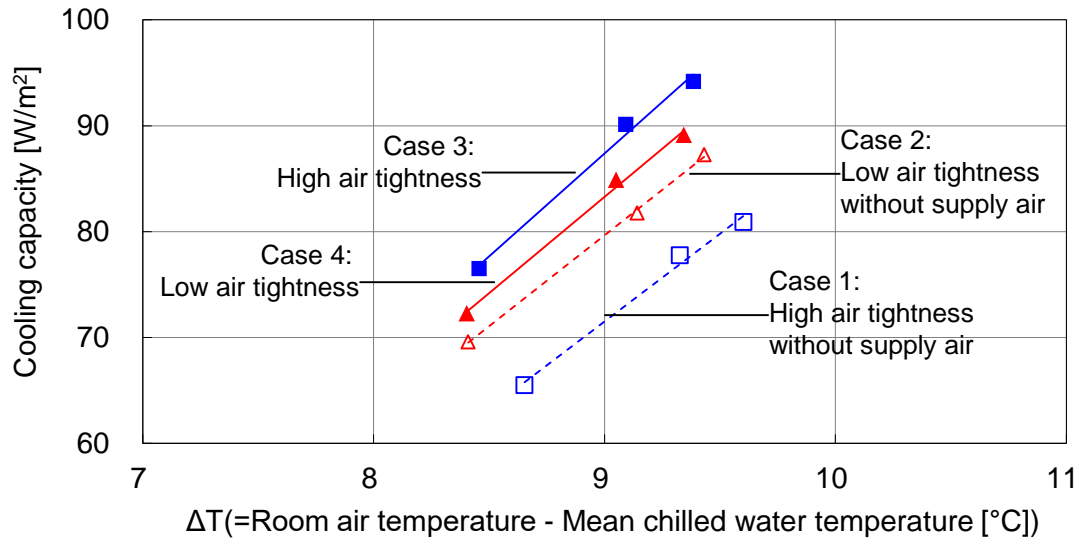


Fig. 2.2.17 各条件での冷却能力

第2章 実大モックアップを用いた天井放射パネル冷却能力検証実験

2.3 高開口率の天井放射パネルの様々な敷設条件での冷却能力検証実験

2.3.1 高開口率天井放射パネルの概要

Fig. 2.3.1, Fig. 2.3.2 に本実験で検討の対象とした高開口率天井放射パネル(以下, スリットパネルとする)の形状を示す。一般的な天井放射パネルは, 前節で示したインテリアパネルのように, 配管, 天井パネル, 天井パネルと配管内の冷温水との伝熱を促進させるためのヒートシンクから構成される。スリットパネルはヒートシンクを省略し, 天井パネルに直接配管を取り付けることで, 材料削減によるコストダウンを意図している。また, この形状とすることで比較的小さなパネルとしても天井パネルと接触する配管の長さを確保することができ, 伝熱性能が向上し, 負荷処理能力向上にも寄与する。さらなる能力向上のため, 天井裏と居室との通気による冷熱利用及び空気との接触面積を確保による対流熱伝達促進のための10mmのスリットをパネル間に設けた。このような形状の工夫により従来の放射パネルに対する冷却能力向上を目指した。これらの能力向上により, Fig. 2.3.3 のように天井放射パネルの敷設率が低い条件でも能力が確保できることを意図している。

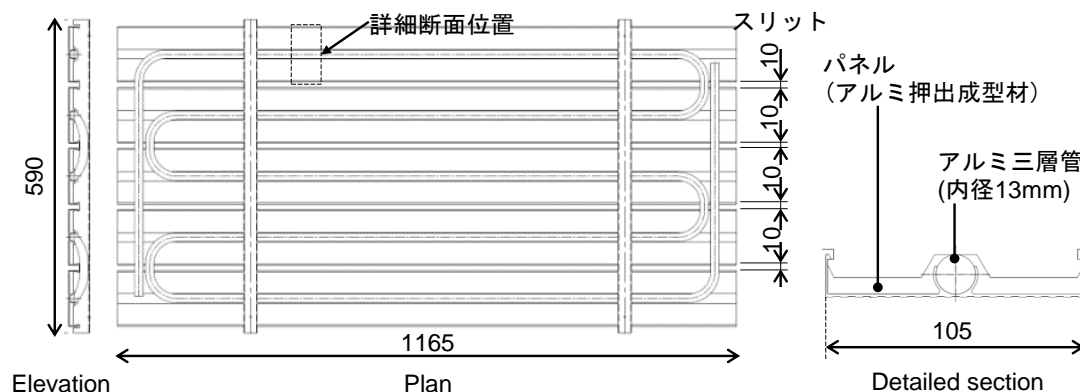


Fig. 2.3.1 高開口率天井放射パネル立面図・平面図・詳細断面図

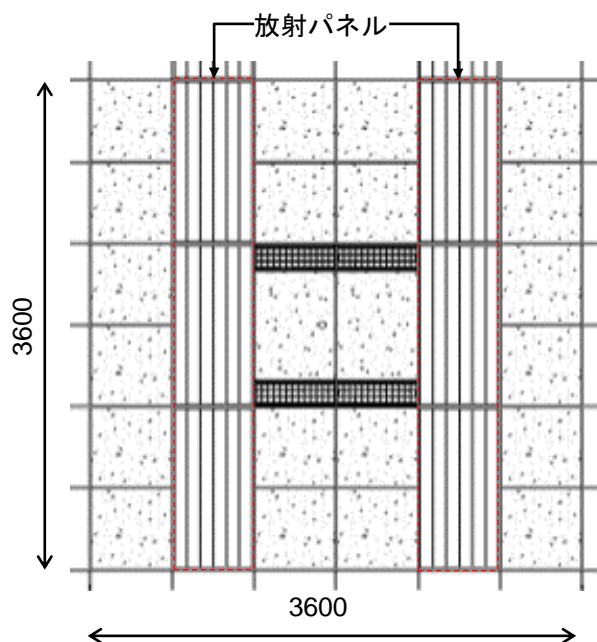


Fig. 2.3.2 高開口率天井放射パネルの想定敷設条件

2.3.2 実験施設仕様

スリットパネルの冷却能力の検証を行うために Fig. 2.3.3 のような実験施設を構築した。天井高さは 2.8 m，天井裏高さは 1.2 m である。環境試験室を 2 つの試験室に分割し，放射パネル以外の部分の天井材を試験室①はガラス繊維パルプ混抄シート（ガラス繊維シート），試験室②は岩綿吸音板（岩吸板）とした。なお，これらの天井材は取外し可能であり，放射パネルのみを設置した条件（スケルトン）とすることもできる。放射パネルの敷設率は 33% である。放射パネルへの送水は 4 枚連結の系統と 6 枚連結の系統とし，試験室①は 4 系統，試験室②は 2 系統としている。図中の数字は冷水の送水順序を示している。

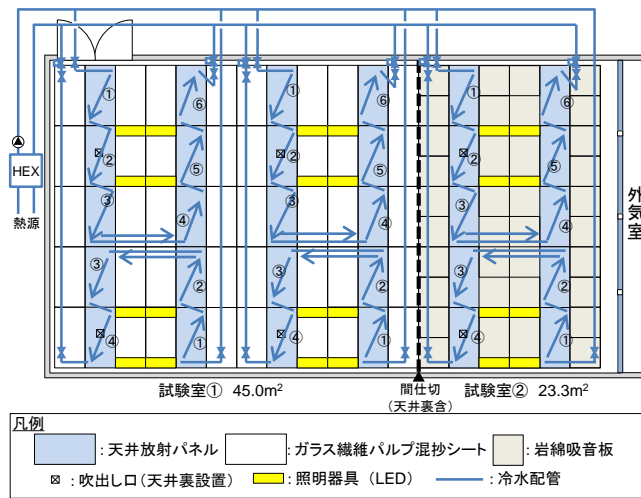


Fig. 2.3.3 実験室天井伏図・配管敷設図

第2章 実大モックアップを用いた天井放射パネル冷却能力検証実験

2.3.3 測定方法

Fig. 2.3.4 にスリットパネルに接続する配管，スリットパネル表面の測定点配置図を示す。これらにより，スリットパネルの処理熱負荷，スリットパネルの放熱量を測定・推定することが可能である。Fig. 2.3.5 に放射収支計の設置位置を示す。これにより，スリットパネルの放射熱伝達量の把握が可能となる。Fig. 2.3.6 に空気温度，壁面温度，気流（風向・風速）の測定点配置図を示す。これらにより，試験室の空気温度分布の把握が可能である。その他，サーモカメラにより，放射パネルの表面温度分布等の把握も行った。

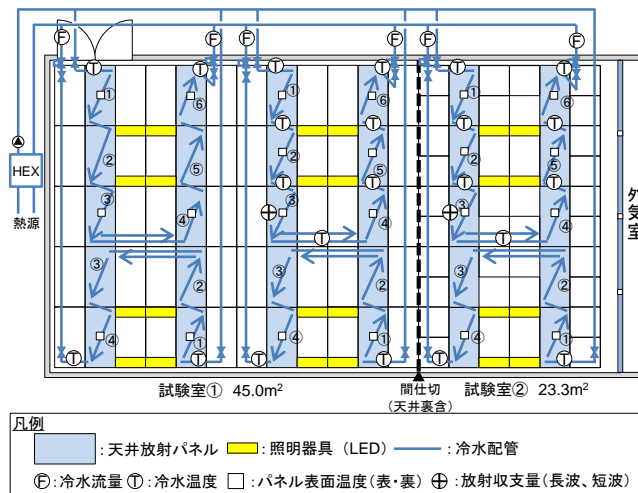


Fig. 2.3.4 放射パネル周りの測定点配置図

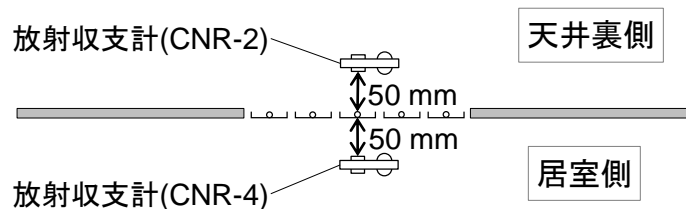


Fig. 2.3.5 放射収支計設置位置

第2章 実大モックアップを用いた天井放射パネル冷却能力検証実験

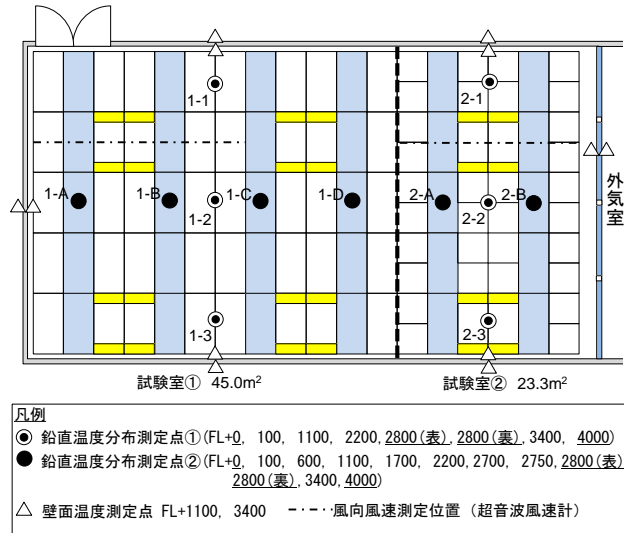


Fig. 2.3.6 空気温度，壁面温度，気流測定点配置図

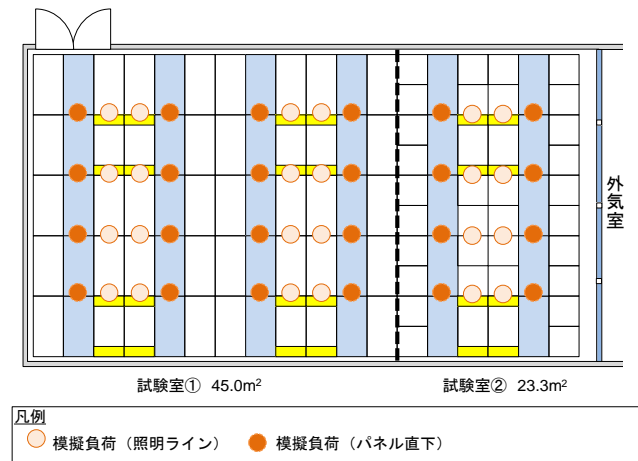


Fig. 2.3.7 模擬負荷配置図

第2章 実大モックアップを用いた天井放射パネル冷却能力検証実験

2.3.4 実験条件

Table 2.3.1 に実験条件を示す。各放射パネル系統における流量を固定し、試験室内の FL+1.1 m での空気温度が 26.0 °C となるように模擬負荷の発熱量を調整した。送水温度はいずれのパターンも 16.0 °C である。実験のパラメータとしては①模擬負荷位置 (Fig. 2.3.7), ②試験室の大きさ (試験室①と②), ③天井放射パネル敷設条件 (Fig. 2.3.8) である。この敷設条件に関しては、スリットパネルの開発に際して実際の適用を想定した敷設方法から検討し、設定した。

Table 2.3.1 実験条件

No.	Case	流量 (1系統) [l/min]	試験 室	天井条件			負荷位置
				天井材	スリット	上部断熱	
1~3	CA_panel	0.5, 1.5, 3	試験 室①	ガラス繊維 シート	有	無	パネル直下
4~6	CA_light			照明ライン			
7~9	SK1_panel			パネル直下			
10~12	SK1_light			照明ライン			
13~15	GB_panel			パネル直下			
16~18	GB_light			照明ライン			
19~21	GB(NS)_panel		試験 室②	岩吸板	無	パネル直下	
22~24	GB(NS)_light				照明ライン		
25~27	GB(I)_panel				有	パネル直下	
28~30	GB(I)_light			照明ライン			
31~33	SK2_panel			スケルトン	有	無	パネル直下
34~36	SK2_light						照明ライン

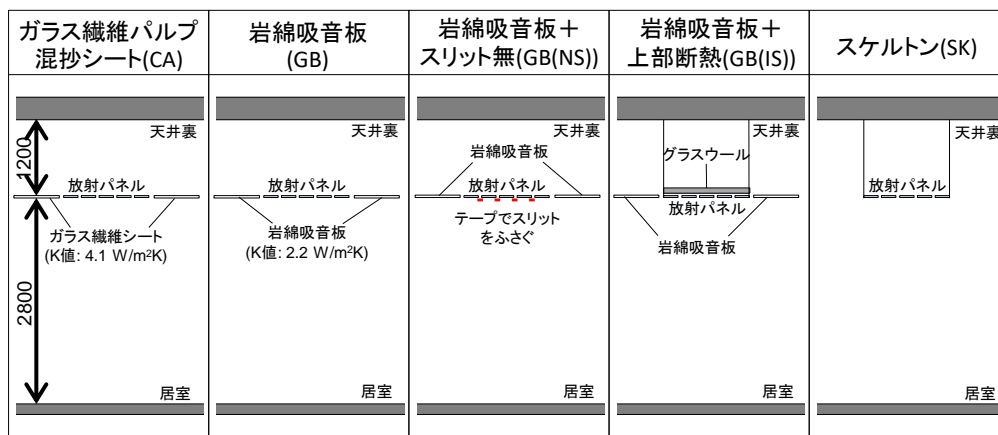


Fig. 2.3.8 天井放射パネルの敷設条件

2.3.5 実験結果

2.3.5.1 鉛直温度分布

① 負荷位置の違い

Fig. 2.3.9 に放射パネル以外の天井材をガラス繊維シートとし、負荷位置をパネル直下と照明ラインとした場合の鉛直温度分布を示す。(凡例の測定点 A, B, C, D の位置は Fig. 2.3.5 参照) 1 系統当たりの流量を 3.0 l/min とした結果を示す。以下、本項で示す温度分布はいずれも 1 系統当たりの流量は 3.0 l/min である。FL+2.2m 以下で上下の温度差が 0.5°C 以内で、天井放射空調での特徴的な上下温度差の小さな温度分布である 2)。負荷をパネル直下とした場合ではパネル近傍 (FL+2.75m) の温度が 0.6~0.8°C 低い。天井裏と居室空気の循環が促進され、この測定点で冷気の下流気流が発生している。冷気の下流気流は同一条件で行った気流可視化実験により確認している。

② 試験室の面積の違い

Fig. 2.3.10 にスケルトンとし、試験室の面積が大きい場合と小さい場合の鉛直温度分布を示す。両者に大きな違いは見られない。いずれもパネル近傍の温度が低く、パネルにより冷却された空気が下降している。

③ 天井条件の違い

・スリット有無の違い

Fig. 2.3.11 に天井材を岩吸板とし、スリット有とスリット無の場合の鉛直温度分布を示す。スリット有のほうが天井裏 (FL+3.4m) の温度が 0.3°C 高く、スリットを経由して、居室と天井裏空気が循環しており、スリットが天井裏の冷熱利用に寄与していることが分かる。

・天井材の違い

Fig. 2.3.9~Fig. 2.3.11 に関して、天井条件の違いに着目し、天井裏の空気温度を比較すると岩吸板+上部断熱、スケルトン、ガラス繊維シート、岩吸板 (スリット有)、岩吸板 (スリット無) の順番で温度が低い。岩吸板+上部断熱が他のパターンよりも高いのは放射パネルの天井裏への放熱が阻害されたためである。その他の条件に関しては、天井裏と居室の通気性や熱貫流率が関係し、このような結果になったと考えられる。

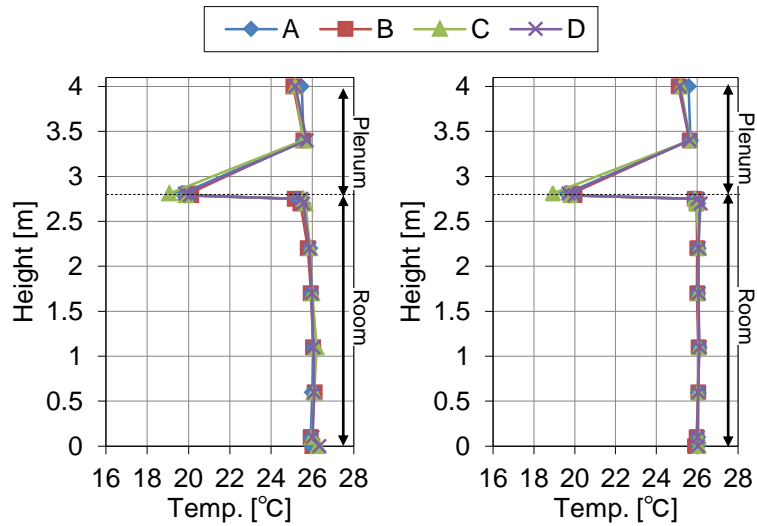


Fig. 2.3.9 天井材:ガラス繊維シート 負荷位置:(左)パネル直下 (右)照明ライン

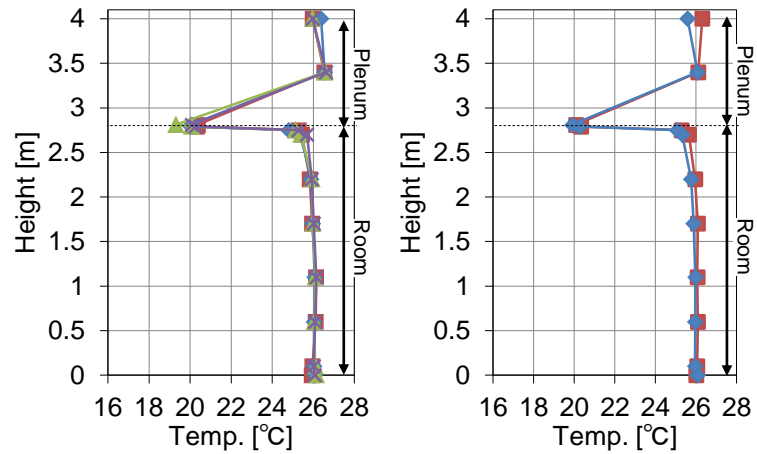


Fig. 2.3.10 天井材:なし(スケルトン) 試験室:(左)大 (右)小

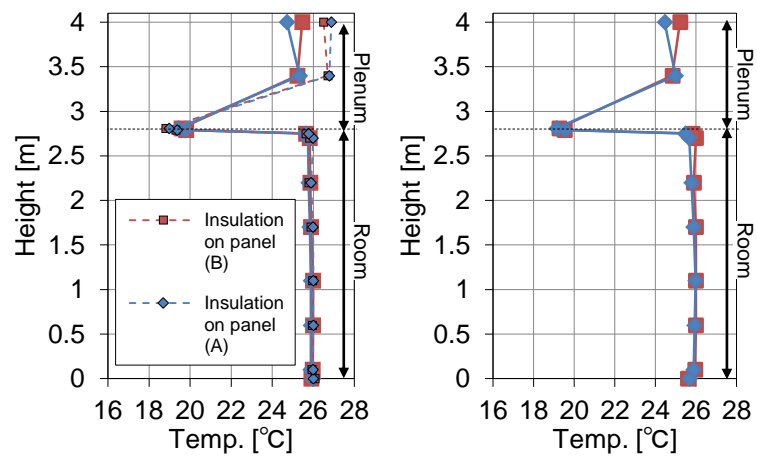


Fig. 2.3.11 天井材:岩綿吸音板 スリット:(左)あり (右)なし

2.3.5.2 気流分布

Fig. 2.3.12 に超音波風速計により測定した気流分布を示す（測定位置は Fig.2.3.6 参照）。いずれも模擬負荷位置は照明ラインである。天井の条件をスケルトンとすると、パネル下での気流が見られる（Fig. 2.3.12 右上）。

スケルトン以外では模擬負荷の上昇気流が放射パネルの方向へ左右に分かれ、負荷の無い箇所及び壁面近傍で下降気流が形成されている。また、スリット有のほうが無よりも全体的な気流が大きい。スリットを設け、天井裏と居室の通気がある状態とすることで、放射パネルの対流が促進されている。

風速に関してはいずれの場合も FL+1.7m 以下の居住域では 0.1m/s 以下で、静穏な環境となっている。

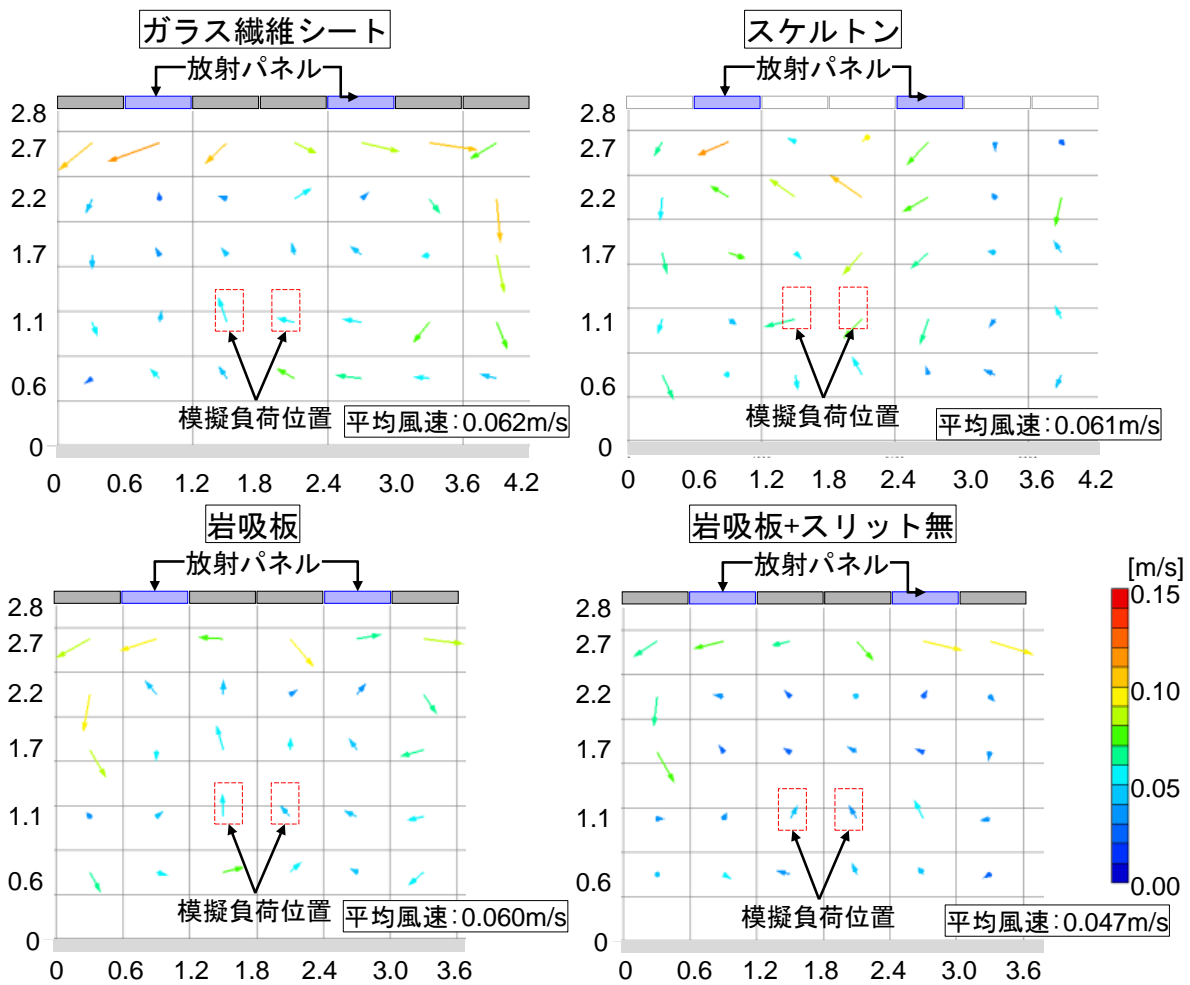


Fig. 2.3.12 各条件での気流分布

第2章 実大モックアップを用いた天井放射パネル冷却能力検証実験

2.3.5.3 パネル近傍温度

Fig. 2.3.13 に天井近傍 (FL+2.75m) の空気温度の測定結果を示す。また, Fig. 2.3.14 に天井近傍の測定位置を示す。室温 (FL+1.1m での平均温度) との温度差でプロットしている。値が正であれば, 室温よりも温度が高く, 負であれば, 室温よりも温度が低い。

スケルトンではパネル直下で温度が低くなっている。パネル裏に熱気を導入し, 直接スリットから冷気が下降している現象が起きていると考えられる (Fig. 2.3.13 右上)。スケルトン以外では模擬負荷による熱気が天井付近 (各グラフの中央) でとどまり, 放射パネルの表面と天井裏の冷気と熱交換され, 負荷から離れたパネルの端部で温度が低くなっている。気流分布とパネル近傍温度の測定結果より, 模擬負荷から発生する熱気がパネルとの対流熱伝達により冷却されている状況が確認できた。

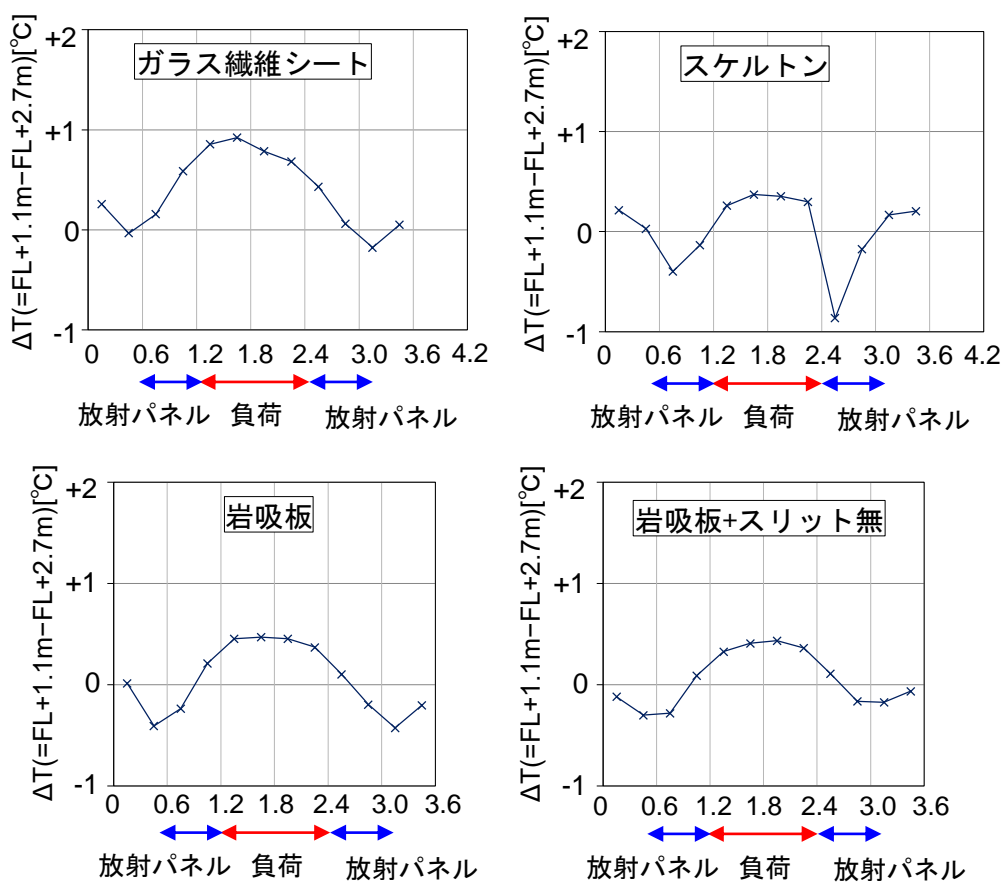


Fig. 2.3.13 各条件におけるパネル近傍温度

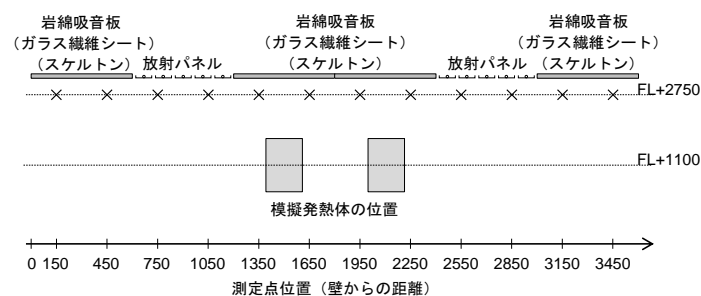


Fig. 2.3.14 パネル近傍温度測定点配置図

2.3.5.4 能力線図

Fig. 2.3.15 と Fig. 2.3.16 にそれぞれ負荷位置を照明ラインとした場合とパネル直下とした場合に EN14240¹⁾に基づいた放射パネルの能力線図, Table 2.3.2 に能力線図から求めた回帰直線から $\Delta T=9.0[^\circ\text{C}]$ での処理熱量を示す。

① 負荷位置の違い

ガラス繊維シートを天井条件とした場合において、負荷位置をパネル直下としたほうが照明ラインとした場合よりもパネル処理熱量が大きくなっている。負荷位置が放射パネルの能力に影響を及ぼすことが示されている。負荷位置をパネル直下とすると放射パネルと負荷との対流熱伝達が促進されるためである。ただし、スケルトンや岩吸板での条件において違いが表れていない。これは試験室の大きさ、負荷の居室と天井裏の内訳の影響が大きく、負荷位置の影響が表れなかったと考えられる。

② 試験室の大きさ

天井条件をスケルトンとした場合で試験室①と②で比較すると、部屋が小さいほうが放射パネルの処理熱量が大きくなっている。壁面に沿った気流と放射面が増加することによる影響と考えられたが、熱収支分析・対流熱伝達率による分析を行うと、負荷の天井裏と居室の内訳の違いによる影響が大きいことが示された (2.3.5.5 項参照)。

③ 天井条件の違い

処理熱量は、天井条件に関して、岩吸板+上部断熱<岩吸板+スリット無<岩吸板≒ガラス繊維シート<スケルトンの順番で大きくなっている。

天井材の違いに関しては、負荷位置が照明ラインとした場合において、ガラス繊維シートよりも岩吸板のほうが大きくなった。また、負荷位置をパネル直下とした場合においては、顕著な差は見られなかった。このように天井材の熱貫流率による負荷処理能力への影響は見られず、これに関してはさらなる分析が必要と考えられる。

スリットの効果に関しては、スリット有のほうが、スリット無よりも処理熱量が大きくなっており、天井裏の冷熱利用と対流促進効果が組み合わさって、このような結果になったと考えられる。

放射パネル上に断熱を施すと、冷却能力が低下することが示された。天井裏への放熱が阻害されることが影響していると考えられる。

設定した実験条件の中でスケルトンの処理熱量が一番大きく、スリットを設けた形状にしたことにより、対流促進効果と天井裏への放熱が居室の負荷処理に寄与して、このような結果になったと考えられる。

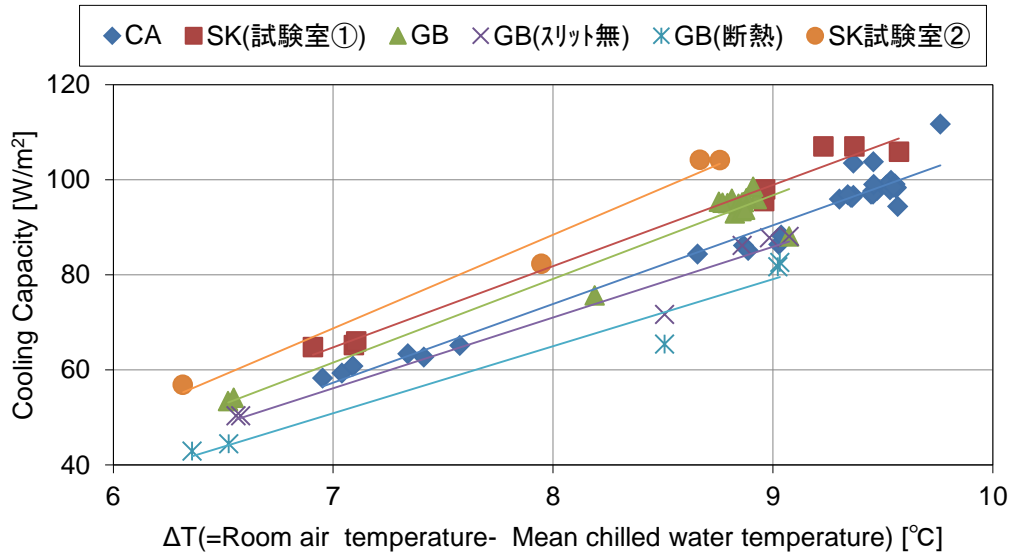


Fig. 2.3.15 能力線図（負荷位置：照明ライン）

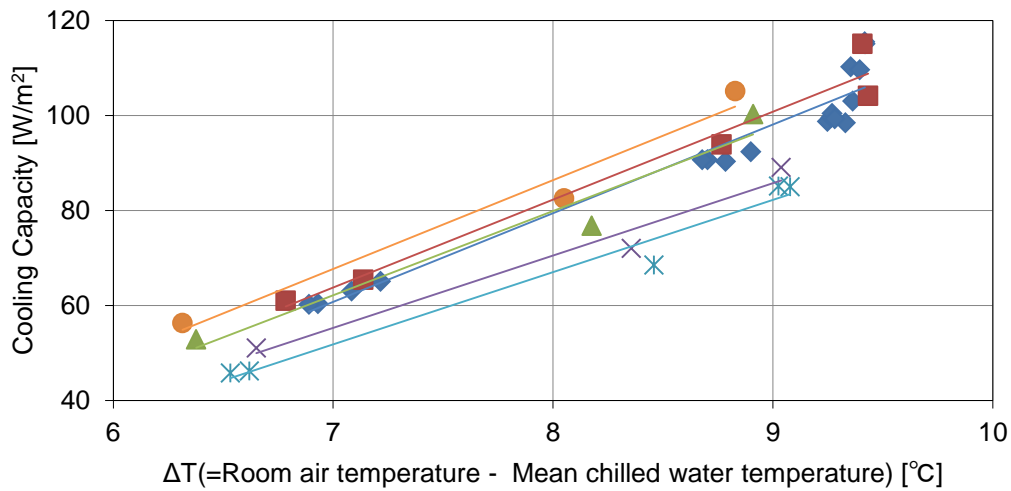


Fig. 2.3.16 能力線図（負荷位置：パネル直下）

Table 2.3.2 ΔT=9.0°Cでの冷却能力の比較

天井条件	試験室	負荷位置	
		照明ライン	パネル直下
ガラス繊維シート(CA)	試験室①	90	98
スケルトン(SK)		99	101
岩綿吸音板(GB)	試験室②	97	98
岩綿吸音板(GB)+スリット無		86	86
岩綿吸音板(GB)+上部断熱		79	82
スケルトン(SK)		108	105

2.3.5.5 熱収支分析

Fig. 2.3.17 と Fig. 2.3.18 に負荷と処理熱量の収支分析結果を示す。試験室に対して、加熱側の負荷を正，除去側の負荷とパネルの処理熱量を負として示している。代表例として，系統ごとの送水流量を 3.0 l/min とした場合を示す。(次項についても同様) 各ケースで正と負の収支は 90~100%程度となっており，実験の精度はおおむね確保できていると考えられる。

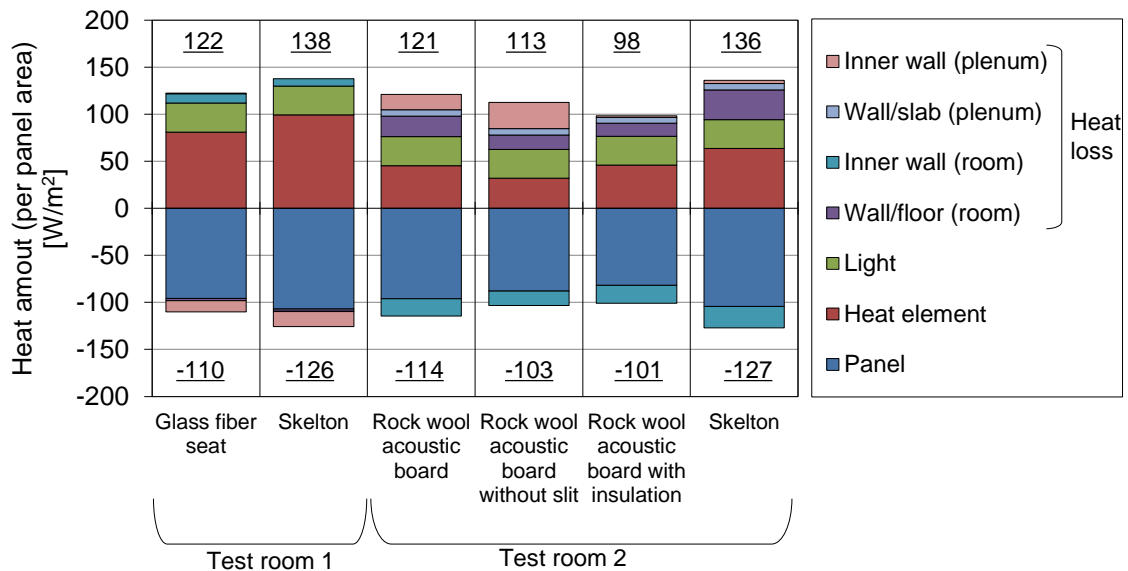


Fig. 2.3.17 熱収支分析(負荷位置：照明ライン)

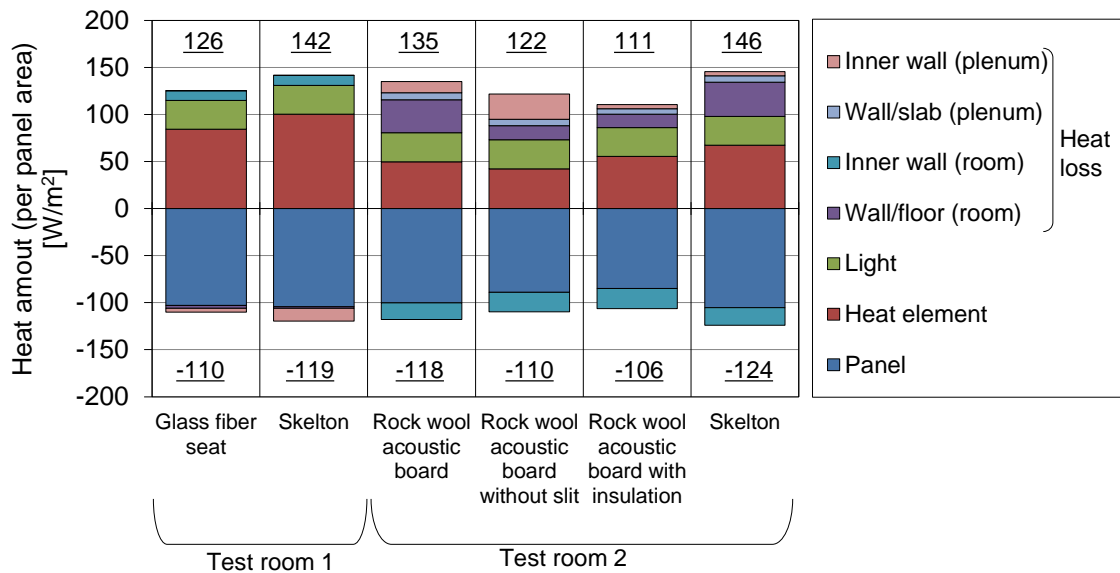


Fig. 2.3.18 熱収支分析(負荷位置：パネル直下)

Fig. 2.3.19 と Fig. 2.3.20 にパネルの処理熱量を居室側・天井裏側及びそれぞれの対流・放射による放熱量（放熱 4 成分）に分離した結果及び試験室に対して冷却側の負荷（図中の「-」）と試験室に対して加熱側の負荷（図中の「+」）

第2章 実大モックアップを用いた天井放射パネル冷却能力検証実験

の比較したグラフを示す。パネルの放熱4成分に関しては下式を用いて算出した。

$$q_p = q_{rr} + q_{rc} + q_{pr} + q_{pc} \dots\dots\dots (2-1)$$

放熱4成分の和を冷水温度差と流量により求められる処理熱量(q_p)とした。放射成分である q_{rr} と q_{pr} は、表面温度測定値とステファン・ボルツマンの式を用いて算出した。なお、放射熱伝達量を計算する際には放射率と表面温度分布を実際の条件に合わせて、設定する必要がある。放射率に関しては、放射収支計による放射熱伝達量とその測定点におけるパネルと壁面や床面などのパネル以外の表面温度差からステファン・ボルツマンの式で得られる放射熱伝達量が等しくなるように放射率を推定することで得た。パネルの表面温度は熱画像により測定した表面温度分布から、分布に関する補正を行った。

q_{pc} は熱流下向きの対流熱伝達率 ($2.18\text{W/m}^2\text{K}$) ⁷⁾ と表面温度と空気温度の測定値を用いて算出、居室側の対流熱伝達量 q_{rc} は q_p と残りの3成分の残差により算出した。

負荷に関しては、Fig. 2.3.21 で負荷・熱流の向きの傾向を示すように、試験室①では試験室②よりも天井裏の空気が高く、天井裏の負荷が負となる傾向がある。これに対し試験室②では、天井裏の負荷が正となる傾向がある。

放熱4成分に関しては、対流熱伝達量が大きいと処理熱量が大きくなっており、天井条件が、対流熱伝達量に影響を及ぼすことが確認された。また、対流熱伝達量の居室側と天井裏側の和(対流成分)は処理熱量の約50%となっており、別途インテリアパネルの対流成分は約40%であり(第3章 Fig. 3.5.16 参照)、対流による放熱の占める割合が従来の放射パネルよりも高い。

天井条件をスケルトンとしたときの試験室①と②の比較をすると、試験室②の方が天井裏の負荷が大きい。第4章での天井放射パネル放熱特性検証基礎実験にて天井裏の負荷を大きくすると処理熱量が大きくなることが示されている。試験室の大小の影響ではなく、天井裏の負荷が大きくなっていることが影響して、負荷処理能力の差が表れていると考えられる。

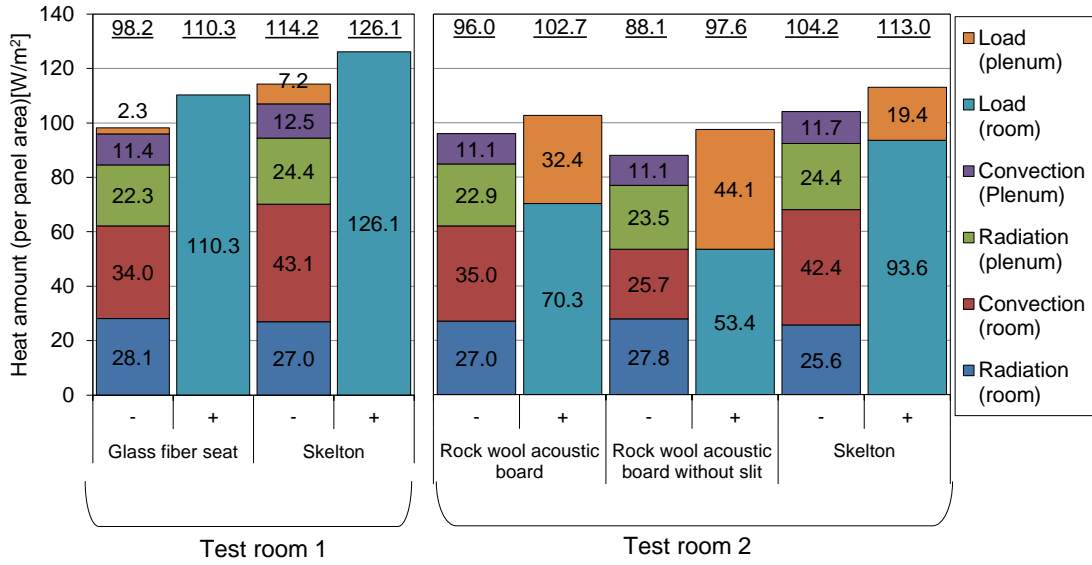


Fig. 2.3.19 パネル放熱量と居室負荷・天井裏負荷の関係 (負荷位置：照明ライン)

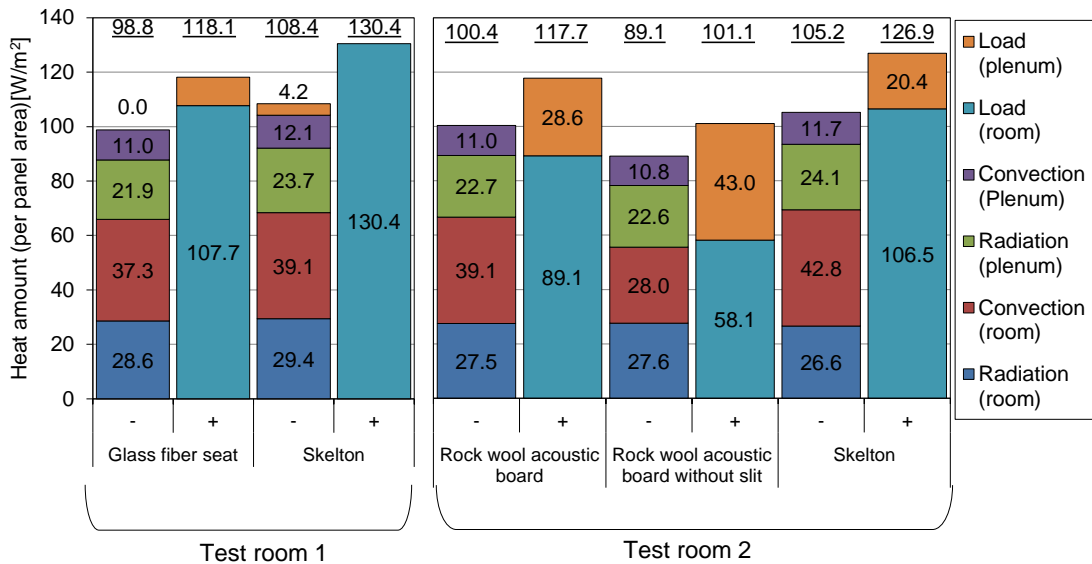


Fig. 2.3.20 パネル放熱量と居室負荷・天井裏負荷の関係 (負荷位置：パネル直下)

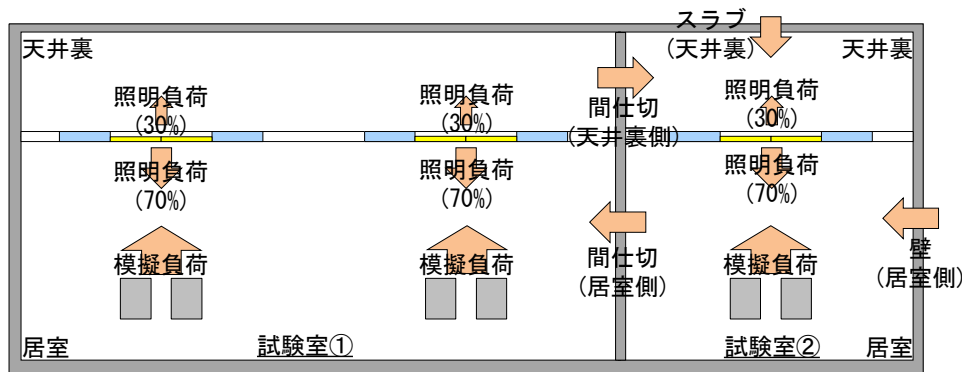


Fig. 2.3.21 負荷・熱流の向きの傾向

第2章 実大モックアップを用いた天井放射パネル冷却能力検証実験

2.3.5.6 対流熱伝達率

Fig. 2.3.22 に前項で示した居室側の対流熱伝達量を y 軸に、空気温度 (FL+1.1m) とパネル表面温度との温度差を x 軸にプロットした散布図を示す。Table 2.3.3 は実験条件ごとに算出した対流熱伝達率 (Fig. 2.3.22 において y 切片を 0 とし、1 次式で回帰した近似式の傾き) を示している。

対流熱伝達率は、2.3.5.4 項で示した処理熱量の順番と対応しており、岩吸板 + スリット無 < 岩吸板 ≒ ガラス繊維シート < スケルトンの順番で大きく、放射パネルの対流熱伝達の促進が負荷処理能力向上に大きく寄与している。

負荷位置の違いに関しては、天井材を設けた条件において、照明ラインとした場合よりもパネル直下とした場合の方が対流熱伝達率は大きい傾向があるが、スケルトンとした場合は顕著な差はない。つまり、スケルトンとする場合は冷却能力は負荷位置に依存しない。

試験室の大きさに関しては、顕著な差は見られず、試験室の大きさに対流熱伝達は依存しないことが示された。

スリットの有無に関しては、有のほうが 1.5 倍程度大きく、スリットによる対流促進効果が示された。

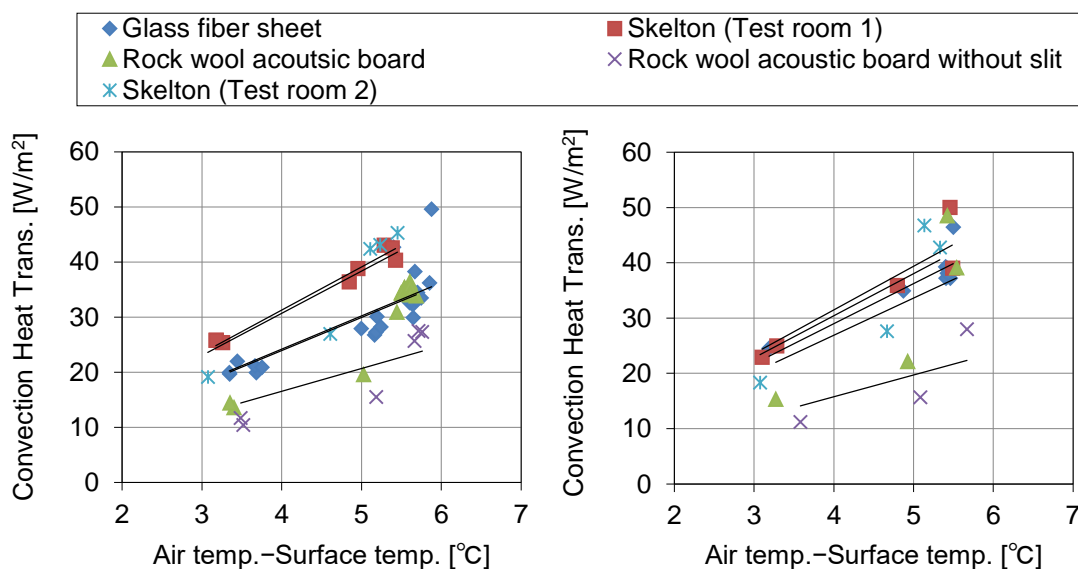


Table 2.3.22 各実験条件での対流熱伝達率

天井条件	試験室	負荷位置	
		照明ライン	パネル直下
ガラス繊維シート (CA)	試験室①	6.0	7.3
スケルトン(SK)		7.8	7.9
岩綿吸音板(GB)	試験室②	6.0	6.7
岩綿吸音板(GB)+スリット無		4.1	3.9
スケルトン(SK)		7.6	7.6

2.4 まとめ

以下に、2つの実験で明らかになったことをまとめる。

高敷設条件での天井放射パネルの冷却能力検証実験

無数の細孔を有するインテリア天井放射パネルとフィン形状としたペリメータチルドビームによる天井放射空調システムの冷却能力検証実験を行い、下記の知見を得た。

- ・ 給気条件、天井の開口の条件により、インテリアパネルの冷却能力が変化することを示した。
- ・ フィン形状としたペリメータチルドビームは、フラットな形状の一般的な天井放射パネルよりも対流促進効果で能力が 1.5 倍程度向上することを示した。

様々な設置条件での高開口率の天井放射パネルの冷却能力検証実験

冷却性能向上と材料削減によるコストダウンを意図したスリットがある天井放射パネルの冷却能力検証実験を行い、下記の知見を得た。

- ・ スリット形状とすることで、パネル表面の空気との対流熱伝達が促進され、冷却された天井裏の空気が下降することが確認され、冷却能力が向上することが明らかになった。
- ・ 負荷位置、試験室の大きさ、天井条件の違いによる冷却能力への影響を明らかにした。

以上より、天井放射パネルの冷却能力の把握には、天井の敷設条件を考慮することの重要性を明らかにした。

変数定義

q_p :	処理熱量	[W/m ²]
q_{rr} :	居室側の放射熱伝達量	[W/m ²]
q_{rc} :	居室側の対流熱伝達量	[W/m ²]
q_{pr} :	天井裏側の放射熱伝達量	[W/m ²]
q_{pc} :	天井裏側の対流熱伝達量	[W/m ²]

参考文献

- 1) EN 14240: Ventilation for buildings – Chilled ceilings – Testing and rating, European Committee for Standardization, 2004.
- 2) 放射（輻射）冷暖房協会: ARCH 2017 CHTRS Ver. 1.1 天井放射冷暖房パネル性能試験規格書, 2018.5
- 3) Jae-Weon Jeong, Stanley A. Mumma: Practical cooling capacity estimation model for a suspended metal ceiling radiant cooling panel, Building and Environment, Volume 42, Issue 9, pp. 3176-3185, 2007
- 4) 瀬沼央, 武田仁: 輻射冷暖房パネルの熱特性実験と数値解析, 日本建築学会計画系論文集, No.500, pp.15-21, 1997.10

第2章 実大モックアップを用いた天井放射パネル冷却能力検証実験

- 5) 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 624 号, pp. 221-227, 2008. 2
- 6) 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, No. 683, pp. 31-37, 2013.1
- 7) G. B. Wilkes, C. M. F. Peterson.: Radiation and convection from surfaces in various positions, Transactions American Society of Heating and Ventilating Engineers, Vol. 44, pp. 513-522, 1939.

第3章 適用建物における天井放射パネル冷却能力検証

第3章 適用建物における天井放射パネル冷却能力検証

3.1 既往研究の課題と本章の位置づけ

空調システムの性能の検証には、実験による方法、実建物における実測による方法がある。新たに空調システムの開発を行う際には、実験にて設計で必要とされる性能が満たされるかどうかを確認し、その空調システムが適用された建物において、実験で得られた性能が満たされているかどうかを検証することが必要とされる。実測による方法については、天井放射パネル空調は国内において適用例が少ないため、天井放射パネルが実際の建物において実験で得られた性能が得られているかどうかの確認を行った例が少ないのが現状の課題である。そこで、2章の「高敷設条件での天井放射パネル冷却能力検証実験」で冷却能力が確認された天井放射空調システムが適用された建物（以下、S社本社と称す。建築概要をTable 3.1.1に示す。）において、インテリア天井放射パネルとペリメータチルドビームの性能検証実測を行った。この実測により、実験の方法の妥当性を検証し、天井放射パネルが実際の負荷に対してどのように処理するのかを把握した。

Table 3.1.1 適用建物 建築概要

敷地面積	2,728.11m ²
建築面積	2,170.36m ²
延床面積	51,355.84m ²
建物高さ	106.23m
階数	地下3階－地上22階－塔屋1階
構造	RC造（一部S造）、免震構造
工期	2009年4月～2012年5月

3.2 実測対象天井放射パネル空調システム

本論で扱う空調システム¹⁾（以下、本システム）をFig. 3.2.1に示す。インテリアにおける機器発熱・人体顕熱負荷はインテリア天井放射パネル（以下、インテリアパネル）で処理する。

ペリメータにおける窓・外壁からのペリメータ負荷はペリメータチルドビーム（以下、チルドビーム）で処理する。インテリアにおける天井放射空調の利点を損なわずに、ペリメータ負荷を処理するため、インテリアパネルに供給される同じ熱源からの冷水を供給し、フィン形状とし、空気との接触面積を大きくすることで自然対流を促進させ、冷却能力をインテリアパネルより向上させている。ファンを用いずに自然対流を効果的に用いることでドラフト感を抑えることが出来る。このように室内の負荷分布に応じて能力の異なる放射パネルを配置していることが本システムの大きな特徴である。

外気を供給するための外気処理システムは潜熱負荷処理のみを最低限行い、給気温度は室温と同等とする。これより、外気処理システムによる顕熱処理を最低限に抑えるねらいがある。潜熱負荷処理された外気は床吹出口から供給される。還気は、インテリアにおいては天井裏に還気口を設け、インテリアパネ

第3章 適用建物における天井放射パネル冷却能力検証

ルの細孔から還気を吸い込む天井レタチャンバー方式としている。ペリメータにおいては、ブラインドボックスに還気口を設けて、窓面に日射が入射することによって発生する熱気を吸い込む方式としている。

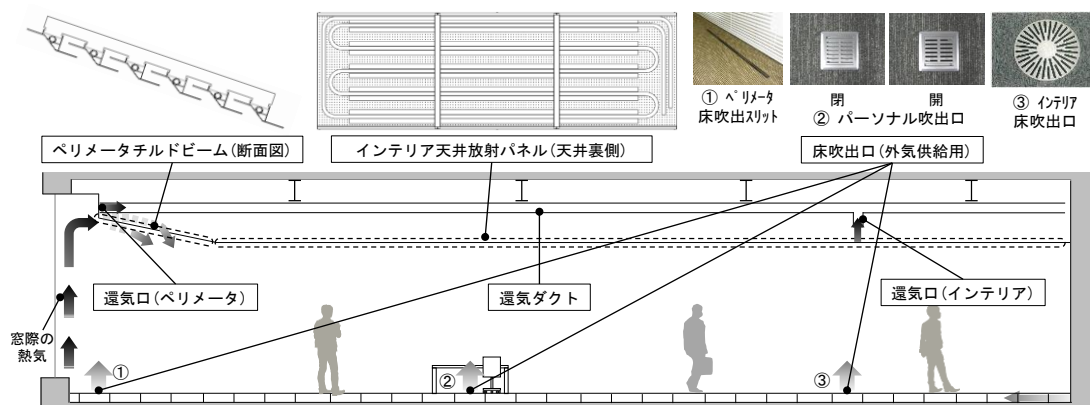


Fig. 3.2.1 検証対象システム

3.2.1 水搬送システム構成

天井放射パネルへの水搬送システムは、各階にインテリア系統とペリメータ系統の熱交換器及びポンプを設置した各階ポンプ方式を採用している。これにより、各階のインテリア及びペリメータの送水温度を室内の負荷状況に合わせて変更することが可能となる。

Fig. 3.2.2 にシステム系統図を示す。インテリア系統においては、年間を通じて冷房負荷となるため、冷水専用熱交換器を設置している。ペリメータ系統においては、冷房または暖房を行うため、冷水/温水切替型熱交換器を設置している。

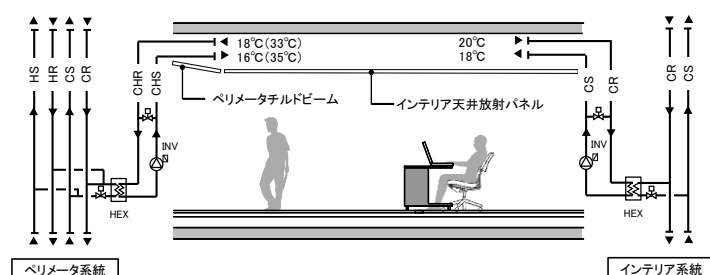


Fig. 3.2.2 システム系統図

3.2.2 インテリアゾーンの構成・制御方式

Fig. 3.2.3 に天井放射空調の制御ゾーンングを示す。インテリアの制御単位は約 80 m^2 で1フロア当り12ゾーンとなっており、Fig. 3.2.1 に示すインテリアパネルをシステム天井形式で配置している。インテリアパネルは5枚を1系統とし各々が直列で接続されている。制御方式に関しては、天井に設置された空気温度センサーによる2方弁制御により、流量を調整している。

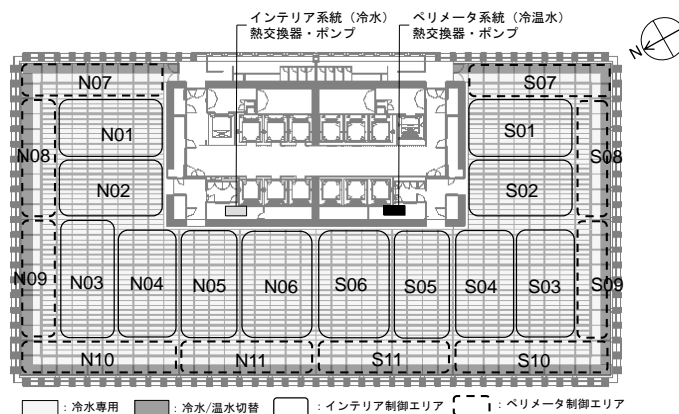


Fig. 3.2.3 制御ゾーニング

3.2.3 ペリメータゾーンの構成・制御方式

ペリメータの制御単位は方位毎に約 50 m^2 で1フロア当たり 10 ゾーンとなっており、Fig. 3.2.1 に示すチルドビームを傾斜天井形式で配置している。

ペリメータゾーンの構成を Fig. 3.2.4 に示す。チルドビームは3枚で構成されており、窓側の2枚はペリメータシステムの熱交換器から冷温水が供給され、季節に合わせて冷房/暖房の切替えを行う。インテリア側の1枚はインテリア熱交換器から年間冷水が供給される。よって、夏期においては、冷水+冷水で冷房を行い、中間期、冬期は冷水+温水とすることで、4管式の制御で制御ゾーン毎に冷房/暖房を切替えることが可能となっている。制御方式に関しては、インテリアゾーンと同様、天井設置の空気温度センサーによる2方弁制御により、流量を調整しているが、窓面の放射温度により、空気温度の設定値を補正することでペリメータ負荷の変動に即応するように意図している。

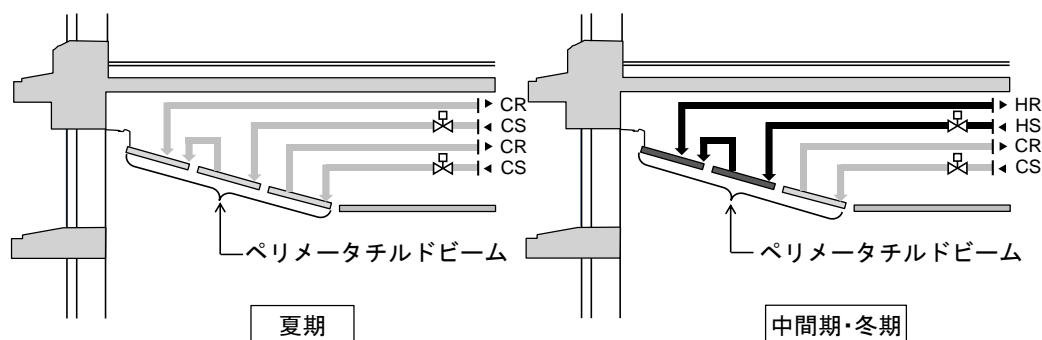


Fig. 3.2.4 ペリメータゾーン構成

3.3 実測期間

空調性能検証実測は下記の2つの期間に分けて行った。

(1)2012年実測

適用建物における運用初年度のインテリアパネル及びペリメータチルドビームの冷却能力等の基本的な性能を確認することを目的とした実測である。

実測期間：2012年7月23日～8月5日

(2)2013年実測

冷却能力のほか、天井放射パネルの放熱特性の分析、運用初年度から制御設定の変更による運用状況への影響を確認することを目的とした実測である。

実測期間：2013年7月27日から8月25日

3.4 2012年実測

3.4.1 実測方法

本節における分析はBEMSデータを利用した評価を基本としているが、Table 3.4.1に示すように室内空気温度、表面温度に関しては追加測定ポイントとして加え、インテリアではN04ゾーン、ペリメータではN10ゾーンを対象に測定した（Fig. 3.4.1）。パネル表面温度はインテリアパネルについては直列で接続された5枚に対し各1点、ペリメータチルドビームについては窓側の2枚に対し各1点測定した。なお、測定期間中の室内温度の設定値は28.0℃、往送水温度の設定値はインテリア系統は18.0℃、ペリメータ系統は16.0℃であった。

Table 3.4.1 測定ポイント

測定項目	測定機器[型番(メーカー)]	測定点数
往冷水温度	Pt100[TY783(azbil)]*	インテリア×1, ペリメータ×1
還冷水温度		インテリア×1, ペリメータ×1
送水流量	電磁流量計[TGG10C(azbil)]*	インテリア×1, ペリメータ×1
インテリア 機器発熱	クランプメータ [AKW4803C(ハナソニック)]*	照明×1, コンセント×1
日射量	日射量計[MS602(英弘精機)]*	鉛直面×4(東西南北) 水平面×1
室内空気 温度	Pt100[CE+PT100S-001(ロイヤル機器)]*	インテリア×1, ペリメータ×1
	小型温度センサー[1923 (KN 株式会社)]	インテリア×1, ペリメータ×1
パネル表面 温度	小型温度センサー[RTR52 (T&D)]	インテリア×5, ペリメータ×2

※BEMSによる測定

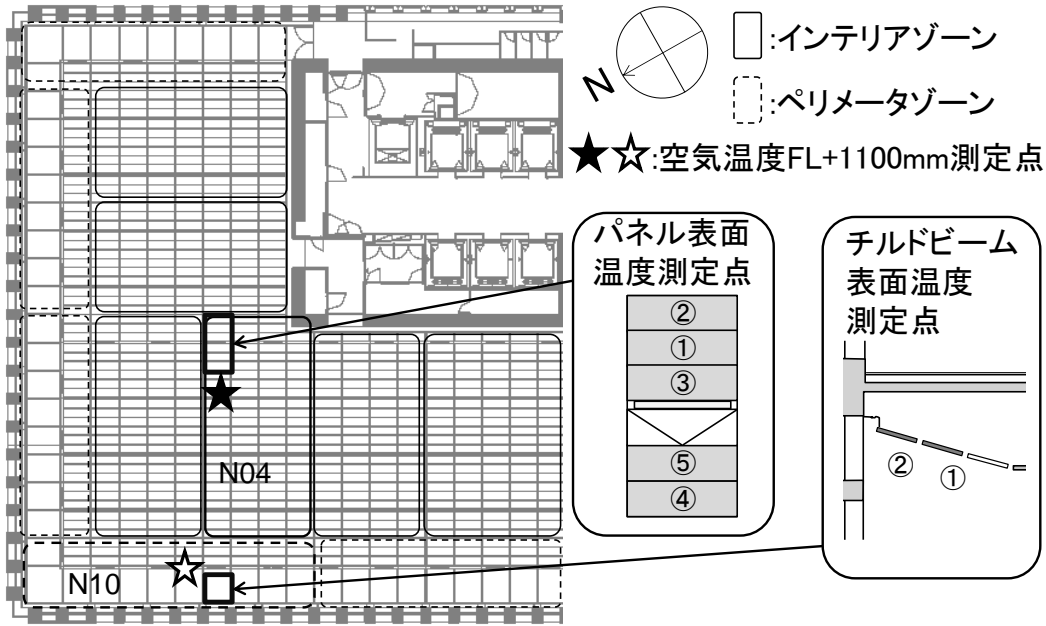


Fig. 3.4.1 追加測定ポイント①

3.4.2 実測結果

3.4.2.1 インテリア室温・インテリアパネル表面温度経時変化

Fig. 3.4.2 にインテリアゾーンでのパネル表面温度，室温の経時変化を示す。運転開始時には立上げ前に制御センサー値が設定温度 28°C を上回っていた影響でバルブの開度が大きくなり，若干の温度低下が見られるが，9:00 以降の制御は比較的安定している。

パネルの表面温度はパネルの送水の順番に高くなっている。①と②の表面温度差が大きくなっているが，②以降は温度差が小さくなっている。これは冷水温度が低い状況で冷水と室温の温度差が確保できる1枚目のパネルで大半の負荷を処理しているため，2枚目以降の冷水温度が高くなり，表面温度差が大きくなったと考えられる。

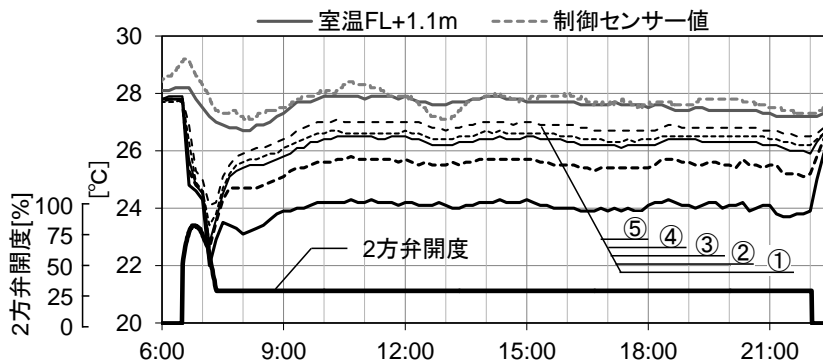


Fig. 3.4.2 インテリアゾーンのパネル表面温度・室温の経時変化

3.4.2.2 ペリメータ室温・チルドビーム表面温度分布経時変化

Fig. 3.4.3 にペリメータゾーンでのチルドビーム表面温度，室温，西面鉛直面日射量の経時変化を示す。室温はインテリアと温度差なく制御されており，適正に負荷が処理されていると考えられる。測定の対象としたゾーンは西外壁面に面しているが，直達日射が窓部に入射しない 14:00 までは立ち上り時を除けば表面温度の最低値は 23.5°C 程度であるが，西面の負荷が大きくなる 14:00 以降に表面温度が低下し，22.8°C 程度まで低下している。このことより，負荷に応じて表面温度が変化していることが分かる。日射の影響が小さくなる 18:00 付近において表面温度が低下しているが，室温の低下に伴いバルブの開度は絞られ，負荷の減に制御が応答していることが確認できる。流量を絞ってもチルドビームの配管内の冷水の熱容量の影響で，急激には表面温度及び室温が高くなることを示している。

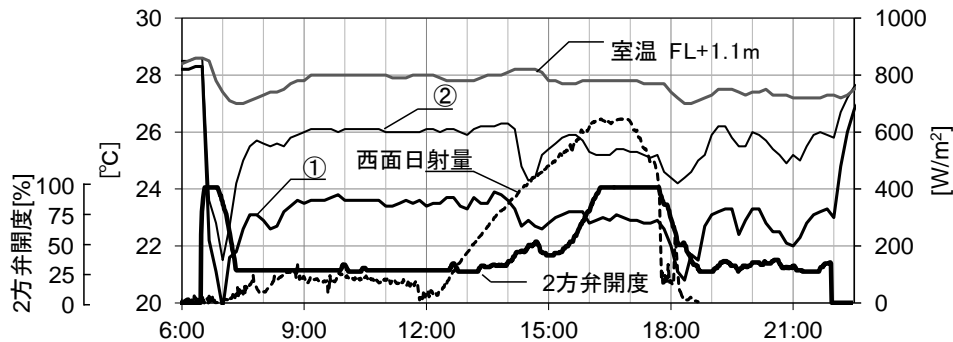


Fig. 3.4.3 チルドビーム表面温度・室温・西面鉛直面日射量の経時変化

3.4.2.3 インテリアパネル処理熱量経時変化

検証階（18F）におけるインテリアゾーン及びペリメータゾーンのそれぞれの合算処理熱量から敷設面積当りの処理熱量を算出した。Fig. 3.4.4 にパネル敷設面積当りのインテリアパネルの処理熱量，インテリア機器発熱負荷（照明とコンセントの合計）を示す。インテリアゾーンの処理熱量は立ち上り時付近を除き 25.0～30.0W/m² 程度ではほぼ一定で推移している。インテリア機器発熱負荷に関しては 20.0 W/m² 前後で推移しており，ほぼインテリアの発熱がインテリアパネルにより処理されていることが分かる。処理熱量とインテリア機器発熱負荷の差が若干あるが，これは人体発熱，インテリアパネルによる上階スラブへの吸熱，ペリメータ負荷の影響が考えられる。

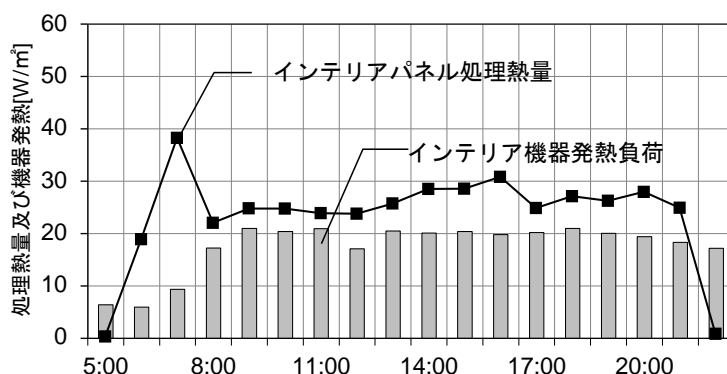


Fig. 3.4.4 インテリアパネルの処理熱量，インテリア機器発熱負荷の経時変化

3.4.2.4 チルドビーム処理熱量経時変化

Fig. 3.4.5 に敷設面積（床面への見付面積）当たりのチルドビームの処理熱量，西及び東面の鉛直面日射量を示す。9:00 と 16:00 でピークが表れており，日射量のピークがそれぞれ東面において 9:00，西面において 17:00 で多少の時間のズレはあるが，ペリメータ負荷の変動に応答していることが示されている。

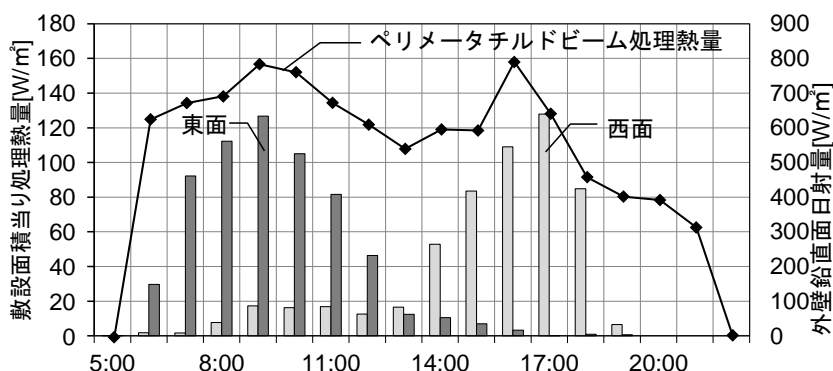


Fig. 3.4.5 チルドビームの処理熱量・西及び東面の鉛直面日射量

3.4.2.5 能力検証結果

Fig. 3.4.6にBEMSより得られたインテリアパネル及びチルドビームの処理熱量を縦軸に、室温と送水温度の平均値（往還冷水温度の平均）の差を横軸にプロットした散布図を示す。2章のFig. 2.2.13に示す実験室での能力測定結果も併記している。ここでプロットした実績データは2012年7月30日～8月10日の期間内でパネルの流量、往還冷水温度が1時間程度一定で、定常と判断できるデータを選定した。インテリアパネルについては環境試験室内でのデータから得られた回帰直線上に実績値がのっている。実験時と実測時の負荷の条件に相違があるが、一般的に天井放射パネルの処理熱量は室温と送水温度の平均値の差に対して線形の関係になる傾向があり²⁾、能力把握方法として本論文の実験方法が概ね実建物の条件を想定が可能であると判断できる。

チルドビームについてはS社本社への適用時に形状の変更を行っており、変更点としてはフィンの向きである（Fig. 3.4.7）。窓部の日射による熱気はチルドビームの表面を沿う形で移動することが分かっており（Fig. 2.2.14）、更に熱交換を促進するためにチルドビームフィンの向きを窓際からの熱気に沿う形とした（Fig. 3.4.7）。そのほか、Fig. 3.4.8に示すように配管とフィンの熱伝導効率を向上させるため、実験時には配管をヒートシンクとフィンで挟み込むことによる固定方法を採用していたが、実建物適用時にヒートシンクを中止し、フィンと配管を直接密着させる方法に変更した。この変更起因して、実験値よりも実績データの方が大きい傾向が表れていると考えられる。インテリアパネルと比較すると $8^{\circ}\text{C} \leq \Delta T \leq 10^{\circ}\text{C}$ の範囲において同じ面積で1.5倍程度冷却能力が高いことが示されている。

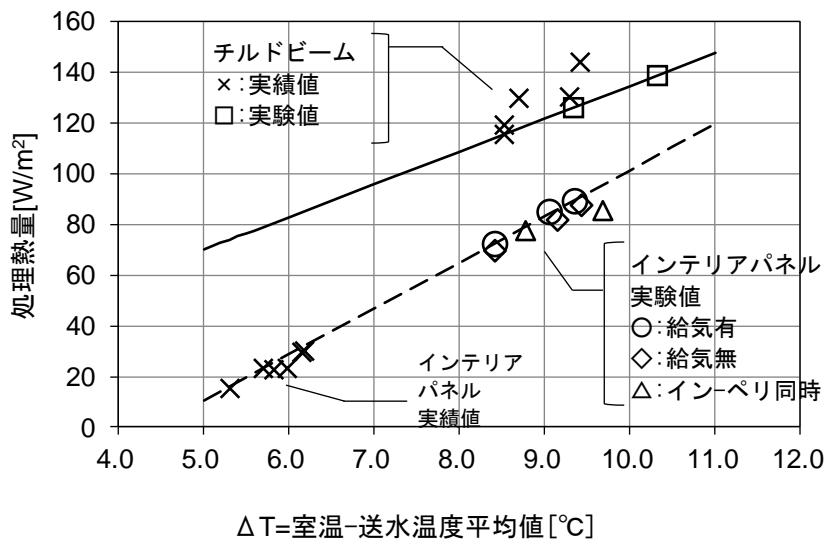


Fig. 3.4.6 冷却能力実績値

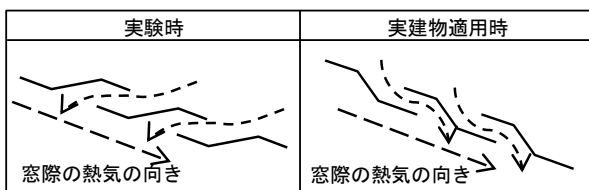


Fig. 3.4.7 フィンの向きの変更

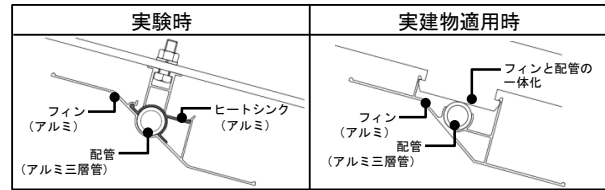


Fig. 3.4.8 フィン固定方法の改善

第3章 適用建物における天井放射パネル冷却能力検証

3.5 2013年実測

3.5.1 実測方法

Fig. 3.5.1 に制御ゾーニング及び測定対象の配置を示す。検証の対象とするのはインテリア負荷処理を行うインテリアパネル、チルドビームの2箇所とした。

測定項目および測定器種類、インテリア・ペリメータそれぞれでの測定点数を Table 3.5.1 に示す。

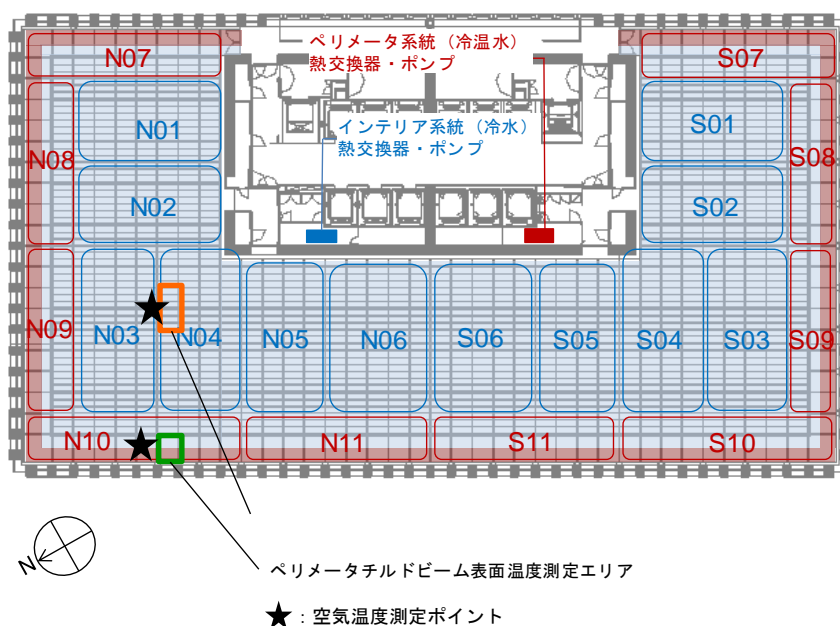


Fig. 3.5.1 検証対象エリア

Table 3.5.1 測定項目一覧

測定項目	測定器種類	測定点数	
		インテリア	ペリメータ
パネル表面温度	おんどとり	10	10
空気温度	おんどとり	2	9
	PMV計 AM-101	1	1
	ハイグロクロン	-	3
	BEMS	1	1
スラブ表面温度	BEMS	1	-
長・短波放射量	放射収支計 CNR-2	1	1
冷水往還温度	BEMS	2	2
冷水流量	BEMS	1	1
2方弁開度	BEMS	1	1
発熱量	BEMS	9	-
外気温度・日射量	BEMS	1	1

第3章 適用建物における天井放射パネル冷却能力検証

インテリアパネルについては、1系統を構成する5枚のパネル表面温度、周囲の空気温度、放射量の測定を行った。また、インテリア制御ゾーン全体における負荷処理熱量及び室内発熱量の把握と、対象となる制御エリアにおける運転状況の確認のために、インテリア系統熱交換器における2次側冷水の往還温度・流量、制御エリアにおける2方弁開度等のBEMSデータを利用した。

Fig. 3.5.2 にインテリアパネル表面温度の測定点平面配置図を示す。1系統における各パネルの表面温度を把握するため、1枚当たり2か所の表面温度を測定した。各パネルの天井裏にある冷水配管の入口側及び出口側の直下にあたる点で居室側パネル表面温度を測定し、その平均値をパネル1枚の表面温度として代表させた。

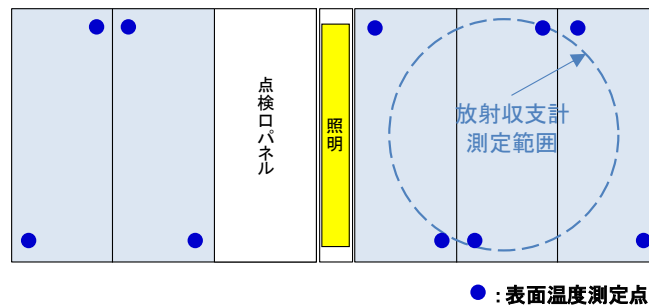


Fig. 3.5.2 インテリアパネル表面温度の測定点平面配置図

インテリアパネルの処理熱量に関して、放熱特性の内訳のうち対流成分を把握するため、Fig. 3.5.3 に示すように天井裏及び居室側のパネル近傍空気温度をおんどりにより測定した。また、放熱特性のうちの放射成分を把握するため、放射収支計を用いて居室側天井表面において長波放射量および短波放射量を測定した。放射収支計は日射計と赤外放射計を組み合わせ、放射成分を長波長と短波長に分離して直接測定することが可能である。放射収支計の設置高さはFig. 3.5.2 のような測定範囲となるように調節した。

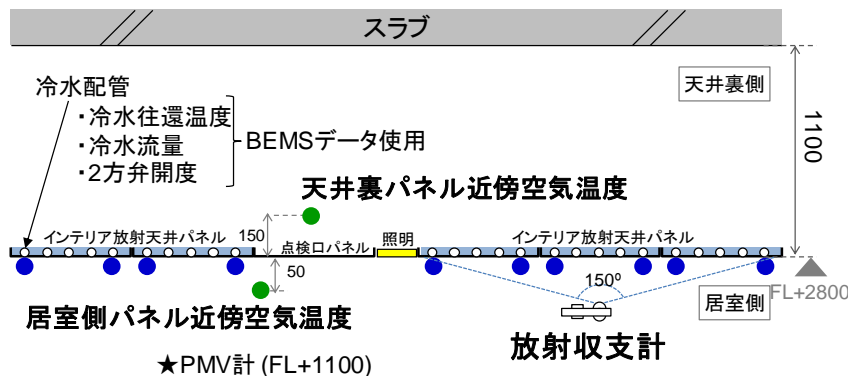


Fig. 3.5.3 天井裏及び居室側のパネル近傍測定ポイント

これらの測定は2013年7月27日から8月25日にかけて行った。測定期間中のインテリアの室内設定温度は27.0℃であった。

第3章 適用建物における天井放射パネル冷却能力検証

チルドビームの放熱特性把握のため、インテリアパネルと同様に表面温度、周囲の空気温度、放射量の測定を行った。また、ペリメータ制御ゾーン全体における負荷処理熱量及び気象条件の把握と対象となる制御エリアにおける運転状況の確認のため、ペリメータ系統熱交換器における2次側冷水の往還温度・流量、制御エリアにおける2方弁開度、外気温度、日射量等のBEMSデータを利用した。

Fig. 3.5.4 に測定点の詳細断面を示す。チルドビームの表面温度の把握のため、フィン部分の表面3点におんどりを設置した。ペリメータ系統の入口側、中央、出口側の3か所について測定した。

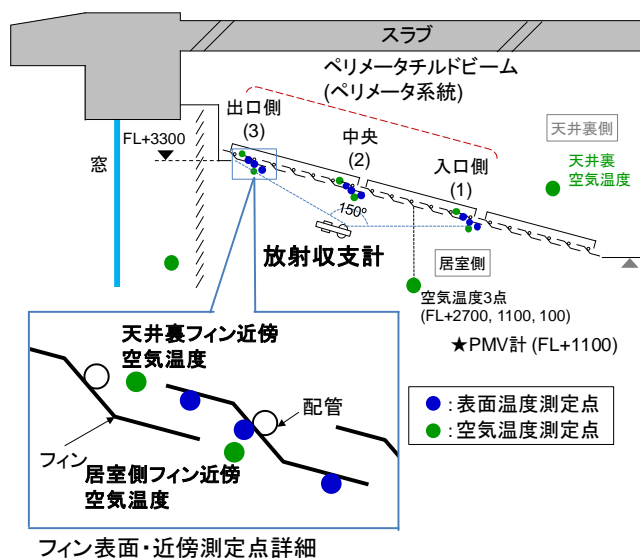


Fig. 3.5.4 チルドビーム部測定詳細断面

チルドビームの処理熱量のうち対流成分を把握するため、フィン近傍で天井裏空気と居室空気それぞれに接する箇所の空気温度を測定した。また、天井裏側への放熱量を把握するため、天井裏の空気温度を測定した。さらに居室側への放射成分を把握するため、放射収支計により長波放射量及び短波放射量を測定した。

測定期間はインテリアパネルと同様で、測定期間中のペリメータの室内設定温度は27℃であった。

3.5.2 インテリアパネル測定結果

(1) 代表日の選定

インテリアパネルの測定結果については、測定期間内でペリメータ負荷及び休日明けの立ち上りの負荷の影響の少ない日を選定し、2013年8月23日を代表日とした。Fig. 3.5.5 に代表日での外気温度、日射量の経時変化を示す。

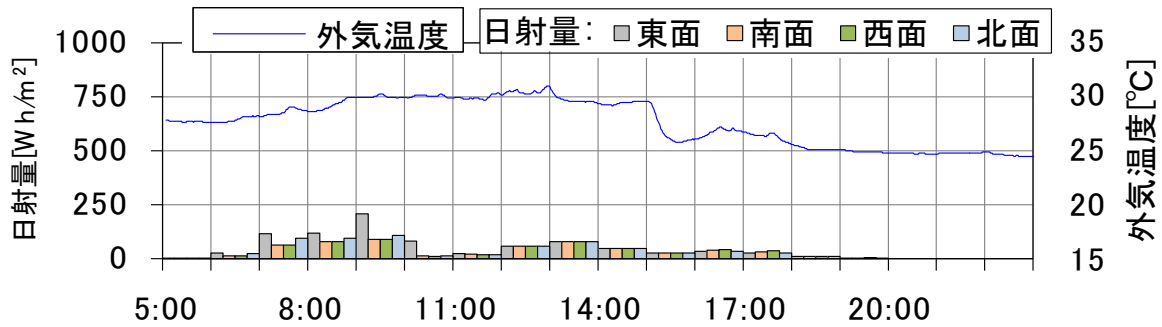


Fig. 3.5.5 インテリアパネル測定代表日の外気条件

(2) 運転状況

Fig. 3.5.6 にインテリア系統熱交換器の冷水往還温度差と流量より求めたフロア全体の処理熱量及び照明とコンセント等の負荷（消費電力量）の1時間ごとの積算値を示す。また、通常業務時間（8:00-18:00）の別途在室率の調査を行った結果をもとに推定した人体の発熱についても示す。ともにインテリアパネルの敷設面積当たりの熱量としている。昼休憩直後（13時）の冷房負荷が大きく増加する時間に処理熱量が大きくなっており、負荷変動に合わせて運転が行われていることが示されている。

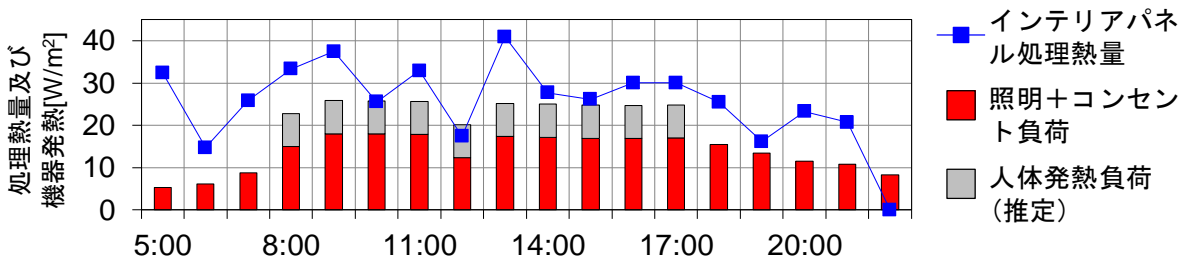


Fig. 3.5.6 インテリア系統処理熱量及び機器発熱経時変化

第3章 適用建物における天井放射パネル冷却能力検証

Fig. 3.5.7 に測定対象とした制御エリアにおける 2 方弁の開度と室温 (FL+1100m) 及び制御センサー (天井設置) の経時変化を示す。設定温度に対して $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ の範囲で制御されていることが分かる。室温と制御センサーと最大で 0.5°C 程度の差があるが、概ね天井設置に設置したセンサーによる空気温度が室温を代表していることが示されている。2012 年夏期では設定値となるのに時間を要していた (Fig. 3.4.2) が、制御設定値の見直しにより、1 時間半程度で設定値に収束しており、改善が見られるが、バルブの開閉が頻繁に行われており、今後調整が必要と考えられる。

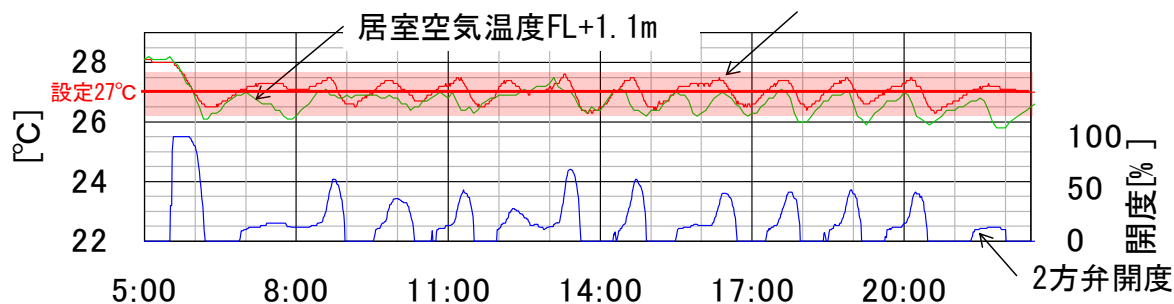


Fig. 3.5.7 インテリア制御エリア室温及び 2 方弁開度経時変化

(3) 表面温度・周囲温度経時変化

Fig. 3.5.8 にインテリアパネルの表面温度及び周囲の空気温度の経時変化を示す。各測定値共に 2 方弁の開度の変化に連動している。2 方弁が開状態のときは、表面温度がパネルへの送水の順番で表面温度が低い。居室側パネル近傍の空気温度は室温とほぼ等しいが、天井裏の空気温度は常に室温よりも低い。インテリアパネルへの送水が停止すると天井裏の空気温度がパネル表面温度よりも低くなり (たとえば Fig. 3.5.9 の 13:50-14:40) , 天井裏空間が蓄冷されていることが示唆される。

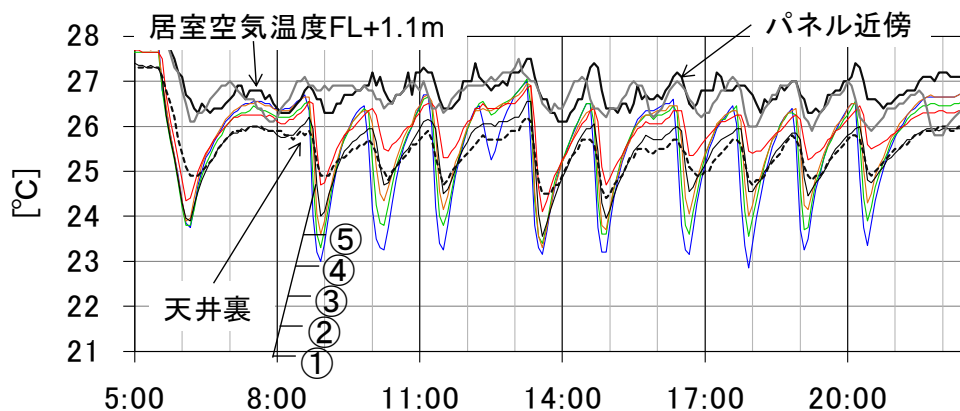


Fig. 3.5.8 インテリアパネル表面温度・周囲空気温度経時変化

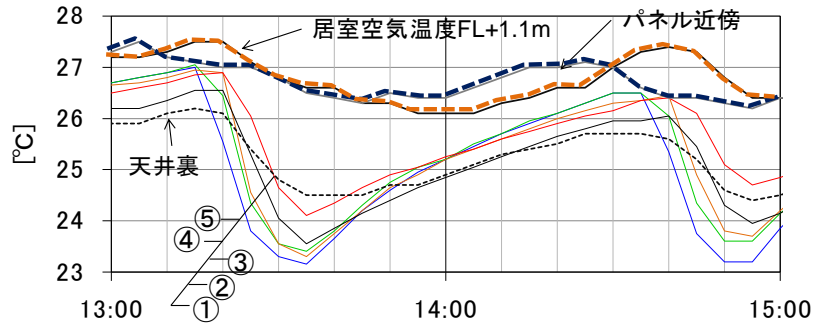


Fig. 3.5.9 インテリアパネル表面温度・周囲温度経時変化（13:00-15:00）

(4) 放射収支量経時変化

Fig. 3.5.10 に放射収支計によるインテリアパネルの長波放射量及び短波放射量の経時変化の測定結果を示す。表面温度の経時変化と同様に2方弁の開度の変化に連動している。インテリアパネルの送水が停止している時間帯でも放射量が正となり、送水が停止してもなお、天井裏及びインテリアパネルの蓄冷効果で負荷を処理していることが考えられる。また、冷水の送水が停止しても、冷放射が持続していることが示されている。

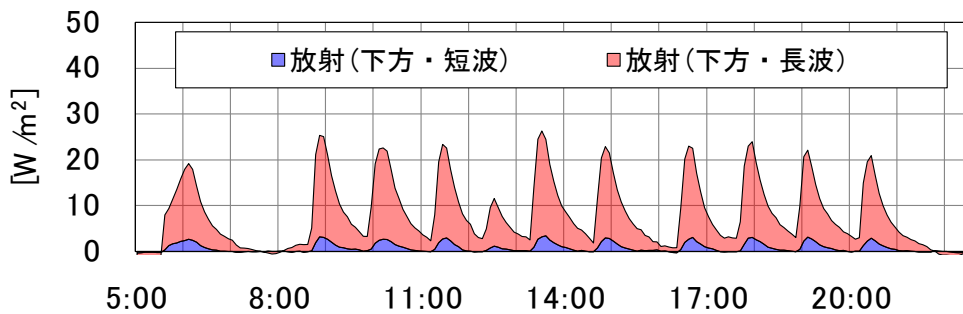


Fig. 3.5.10 インテリアパネル長波・短波放射量経時変化

第3章 適用建物における天井放射パネル冷却能力検証

3.5.3 ペリメータチルドビーム測定結果

(1) 代表日の選定

チルドビームの測定結果は測定期間内で日射量，外気温度ともに高い日を選定し，2013年8月7日を代表日とした。代表日の気象条件を Fig. 3.5.11 に示す。

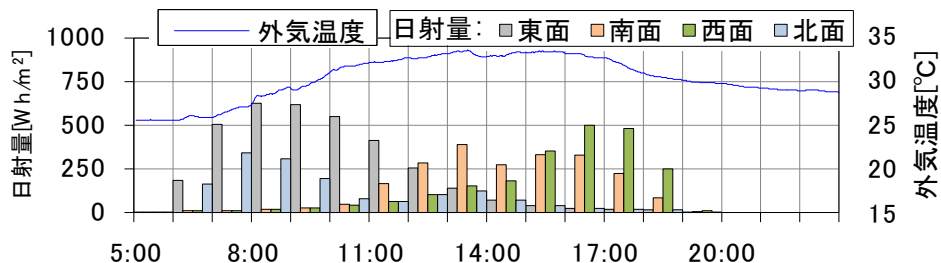


Fig. 3.5.11 ペリメータチルドビーム測定代表日の外気条件

(2) 運転状況

Fig. 3.5.12 にペリメータ系統の冷水往還温度差と流量より求めたチルドビームの床面の見付面積当りのフロア全体の処理熱量を示す。変動は大きくないが，外壁の日射のピーク（8:00:東面，13:00:南面，16:00:西面）に合わせて変動している。

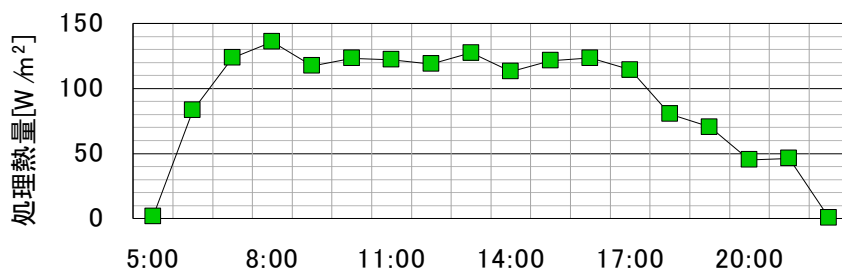


Fig. 3.5.12 ペリメータ系統処理熱量経時変化

Fig. 3.5.13 に測定の対象とした制御ゾーンにおける2方弁の開度及び制御センサーにおける空気温度の経時変化を示す。測定の対象としているのは西の外壁に面したペリメータ域であるが日射が当たらない時間帯では2方弁は間欠的に動作しているが，西外壁面の日射が大きくなるのに従って，100%一定となっている。

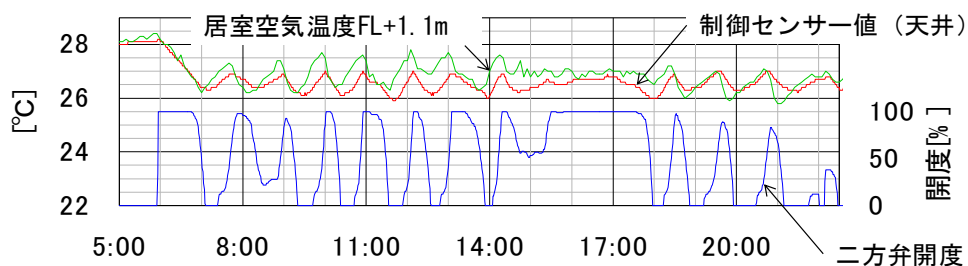


Fig. 3.5.13 ペリメータ制御エリア室温及び二方弁開度経時変化

(3) 放射収支量経時変化

Fig. 3.5.14 に放射収支計によるチルドビームの短波放射量及び長波放射量の測定結果を示す。インテリアパネルと同様に2方弁の開度の変化に連動している。ペリメータ負荷が大きくなる時に最大値となっている。短波放射量の内訳に関して、インテリアパネルにおける測定結果と比べて大きく（短波の占める割合がインテリアパネルは約10%、チルドビームは約18%）、窓面・ブラインドからの透過日射量の影響によるものと考えられる。インテリアパネルと同様に送水が停止しても長・短波放射量の合計は正となっており、蓄冷効果で負荷を処理していることが示されている。

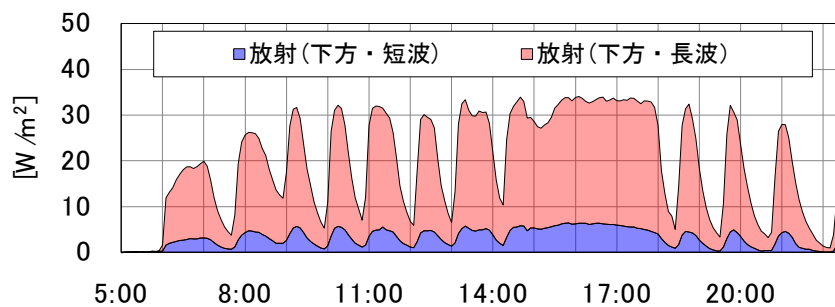


Fig. 3.5.14 チルドビーム放射収支量経時変化

第3章 適用建物における天井放射パネル冷却能力検証

(4) チルドビーム表面温度・周囲温度経時変化

Fig. 3.5.15 に 11:00 と 16:30 における表面温度及び空気温度の測定結果とともに、代表日と別の日に行った気流可視化実験で確認した気流の方向も示す。測定の対象とした制御エリアにおいて、両時間ともに 2 方弁の開度が 100% であるが、11:00 は窓面に直接日射が入射せず、16:30 は窓面に直接日射が入射する時間である。16:30 のほうが居室側フィン近傍の空気温度が高く、窓側の熱気の影響が顕著である。両時間ともに下部になるほど居室側フィン近傍の空気温度がインテリア側のほうが窓側よりも 1.5~1.6°C 低くなり、窓面からの熱気の気流の流れ (Fig. 3.5.15 中の気流 A) に沿ってチルドビーム表面と空気が熱交換していることが示されている。また、可視化実験では傾斜天井の下部で天井裏の冷気が居室側へ流入することが確認されており (Fig. 3.5.15 中の気流 B)、天井裏冷気が負荷処理への寄与していることが考えられる。

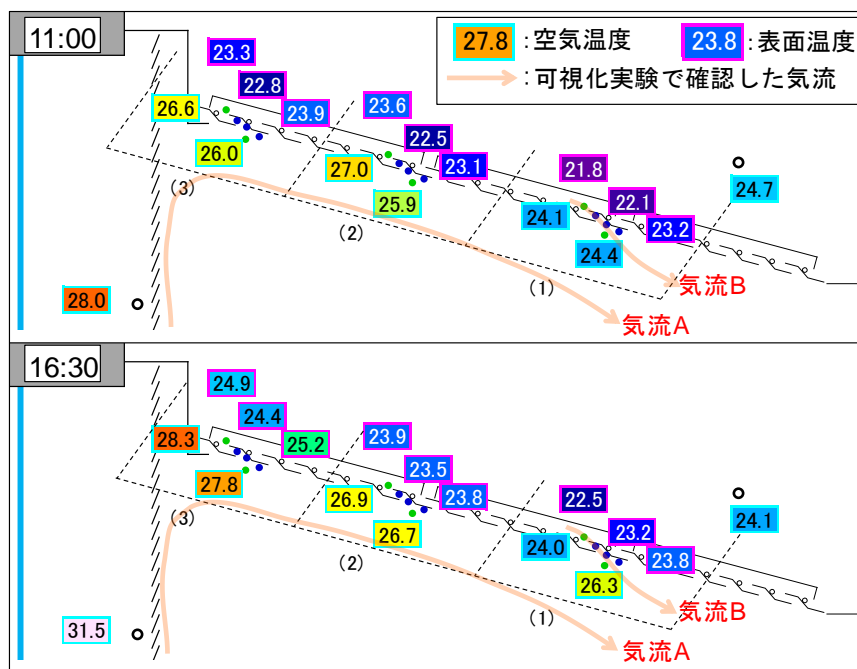


Fig. 3.5.15 チルドビーム周囲温度分布 (11:00, 16:30)

3.5.4 放射・対流成分分析結果

Fig. 3.5.16 にインテリアパネル及びチルドビームの処理熱量のうち放射成分（下方・上方）と対流成分の内訳の推定値を示す。負荷の安定していた時間帯の平均値を示している。図中の数値はパネル面積当たりの処理熱量（単位は W/m^2 ），カッコ内の数値は割合（百分率）を示している。各成分の総和は Fig. 3.5.6, Fig. 3.5.12 の処理熱量から推定した。放射成分（下方）については放射収支計による短波及び長波放射量の和とした。放射成分（上方）についてはステファン=ボルツマンの式を用い，インテリアパネル及びチルドビームの天井裏側の表面と天井裏側のその他の面（スラブ面）の温度差を測定値により推定して算出した。天井裏側の表面温度は居室側の表面温度と等しいと仮定し，スラブ面の温度は上階のスラブの表面温度および天井裏の空気温度を用いて推定した。対流成分は，総和として推定した処理熱量を，測定により求められた放射成分（上方及び下方）を除いて求めた。

以上の方法により放射と対流の比率を算出するとインテリアパネルで 6:4，チルドビームで 3:7 となり，インテリアパネルは試験室にて得られた比率と同様の傾向である。チルドビームのほうがインテリアパネルよりも対流成分の割合が大きく，対流強化型の放射天井パネルとしてチルドビームが機能していることを示している。

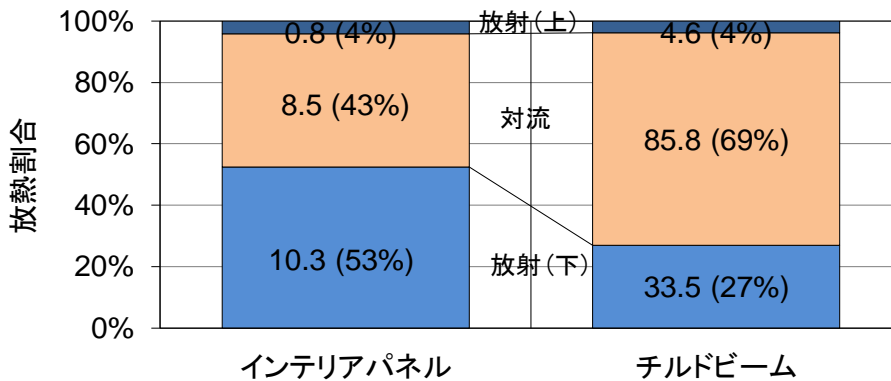


Fig. 3.5.16 インテリアパネル・ペリメータチルドビーム放熱特性推定結果

第3章 適用建物における天井放射パネル冷却能力検証

3.6 まとめ

天井放射パネル空調システムの適用建物における天井放射パネル空調の性能評価検証を行い、本システムが想定通りの冷却能力が出ていることが示された。以下、得られた知見を示す。

- ・ インテリアパネル冷却能力について実績データの分析を行い、実験で得られた能力回帰直線上に冷却能力の実績値が一致することを示した。これより、能力把握方法として本論文の実験方法が妥当であることを示した。
- ・ ペリメータチルドビームの冷却能力の分析を実績データにより行い、実験で得られた能力直線よりも高い値を得た。ペリメータチルドビームの形状の工夫で能力向上が図れることを示した。
- ・ インテリアパネル及びペリメータチルドビームにおいて、放熱量の詳細な分析を行い、チルドビームの対流放熱量が70%程度であることが示され、フィン形状とすることで、対流熱伝達促進が図れることを示した。
- ・ 運転実績データの分析を行い、バルブの開度や室内環境の応答性に関する基礎的なデータを得た。

参考文献

- 1) 荒井義人，高橋満博他：清水建設本社の環境設備計画—持続可能な社会に貢献する都市型超高層オフィスの実現—，空気調和・衛生工学会，第89巻，第7号，pp. 569-574，2015.7
- 2) EN 14240: Ventilation for buildings — Chilled ceilings — Testing and rating, European Committee for Standardization, 2004.

第4章 天井放射パネル空調熱収支モデル

第4章 天井放射パネル空調熱収支モデル

4.1 既往研究の課題と本章の位置づけ

4.1.1 既往研究の課題

天井放射空調の設計にあたって、居室における負荷をどのように天井放射パネルにより処理し、どの程度の能力を見込むかが、重要な検討項目の一つとなる。EN14240 や ARCH 2017 CHTRS において、天井放射パネルの能力の試験方法が規定^{1), 2)}されており、測定の方法、試験室仕様、疑似負荷の仕様、放射パネルの設置方法が規定されている。ただし、天井放射パネルの敷設方法などの規定は特に定められていない。一方、2章で示した実験において、天井放射パネルにおいて天井の開口率が負荷の処理能力に大きな影響を及ぼすことが示されている。以上より、天井放射パネルの性能予測には、天井裏空間や天井放射パネル以外の天井の敷設条件などを考慮することが、重要であると考えられる。

天井放射パネル空調の設備仕様を決定する際に適正な設備容量で機器を選定するには、天井放射パネルの処理する負荷を正確に見込むことが必要である。天井放射パネル空調を適用した建物における設計の試みとして、実験により、天井放射パネルの能力を把握して、建物への適用を行っている例がある^{3), 4), 5), 6)}。ただし、実建物の適用のたびに敷設条件を実建物の条件にあわせて実験を行うことは現実的ではない。天井放射パネル空調の性能評価を行うためには、実験を経ずして、天井放射パネルの敷設条件を考慮に入れた能力の予測が必要になってくる。

天井放射パネルの能力を予測する試みは国内外において多数の報告がされている。岡本らはパネル各部（パネル面、冷水、配管とパネル接合部）での熱収支式を連立させてパネルの放熱量を予測する方法⁷⁾、ISO18566-3 においてはパネル種別ごとのパネル熱抵抗の算出式が提示され、パネルの表面温度や処理熱量を計算する方法⁸⁾が提案されている。これらの方法は冷却面の空間側への放熱量と冷媒側（冷水）による処理熱量との熱収支を解く方法である。天井裏と居室を仕切る形で放射パネルが設置される条件において、放射パネルにより天井裏の冷却された空気が居室の負荷処理に寄与していると考えられ、これらの既往研究の方法では天井裏空気の影響を考慮することが困難である。天井裏を有するパネル敷設方法への対応は塩谷ら⁹⁾により示されており、パネル環境温度により天井裏と居室の温度を平均的に扱い、パネル表面とパネル環境温度との熱伝達により、パネルの放熱量をモデル化している。この方法では天井の開口率の大きな条件では、天井裏と居室空気の温度差が小さいため適用可能であるが、密閉性の高い条件では、天井裏と居室空気の温度差が大きくなるため、居室空気温度の扱いに注意を要する。

4.1.2 本章の位置づけ

上記の課題を踏まえ、本論文は天井放射パネルの種類、敷設方法を考慮に入れ、天井放射パネル空調の設計時に居室空気温度、パネル表面温度及びパネルの冷却能力等の必要な情報（空調性能）を予測可能とすることを目的として、以下を行う。

① 天井放射パネル熱収支モデルの提案

居室及び天井裏の空気及び壁面、天井放射パネルの表面及び配管内の冷水の

熱収支を定式化し、天井放射パネルが処理する負荷及び運用時の室内温熱環境を予測するためのモデル化方法（天井放射パネル熱収支モデル）を提案する。

（4.2 節）

② 天井放射パネル空調の熱収支構造の解明

作成した天井放射パネル熱収支モデルの妥当性を確認するための天井放射パネル放熱特性検証基礎実験を行う。（4.3 節）多様な負荷条件下で天井放射パネルの放熱量との熱収支を分析し、天井裏空気がどのように居室負荷を処理するかを明らかにする。（4.4 節）

③ 天井放射空調熱収支モデルにおける伝熱係数の同定方法及び精度検証

上記基礎実験結果を用いた天井放射空調熱収支モデルにおける各種伝熱係数の同定方法及びその結果を示す。さらに、実験値により同定した伝熱係数を用いて、熱収支モデルによる各熱収支式を連立して解いた空気温度やパネル表面温度、負荷処理能力と実験結果の比較を行い、同定した伝熱係数の精度検証を行う。（4.5 節）

また、実大実験で得られた実験結果を用いて、同様の同定方法が適用可能かどうかの検討も行う。（4.6 節）

第4章 天井放射パネル空調熱収支モデル

4.2 熱収支式によるモデル化

4.2.1 天井放射パネル空調熱収支モデルの定式化

本論文において提案する天井放射パネル空調熱収支モデル（以下、熱収支モデル）は、天井放射パネルの設置される空間において、(A)居室内、(B)天井裏、(C)天井放射パネル居室側表面、(D)天井放射パネル天井裏側表面、(E)天井放射パネル配管内冷水での熱収支をモデル化することで、得ることができる。この熱収支を熱回路網により表現すると Fig. 4.2.1 のようになる。天井放射空調システムと併用する換気システムは、天井裏のダクトと接続した給気口と排気口を用いて換気を行うシステムを想定しており、換気による天井裏と居室空気間の熱移動は無いものとして想定している。以下にこのモデルに基づいた熱収支を定式化したものを示す。

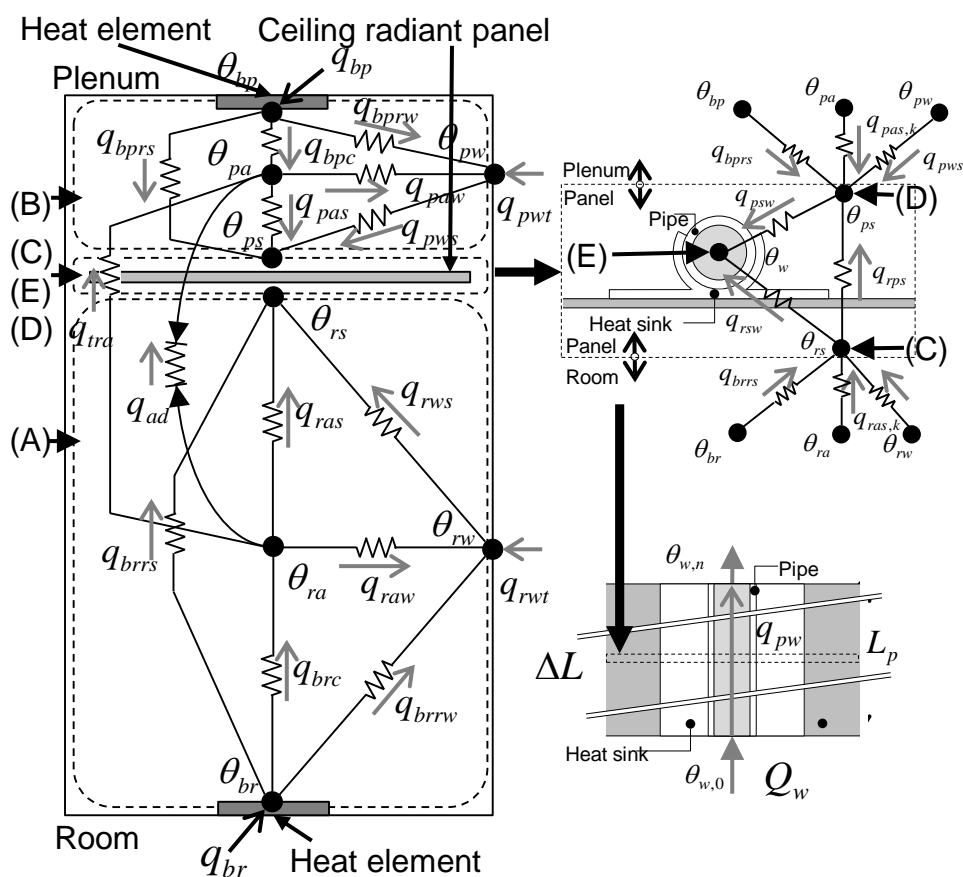


Fig. 4.2.1 天井放射パネル空調熱収支モデル

(A) 居室内の熱収支

$$\rho_a c_a V_{ra} \frac{d\theta_{ra}}{dt} = q_{brc} - q_{tra} - q_{ad} - q_{ras} - q_{raw} \dots (4-1)$$

$$\rho_{rw} c_{rw} V_{rw} \frac{d\theta_{rw}}{dt} = q_{brrw} + q_{raw} - q_{rws} + q_{rwt} \dots (4-2)$$

$$\rho_{br} c_{br} V_{br} \frac{d\theta_{br}}{dt} = q_{br} - q_{brc} - q_{brs} - q_{brrw} \dots (4-3)$$

(4-1)式は居室空気，(4-2)式は居室の壁面（発熱体を除く），(4-3)式は居室発熱体に関する熱収支式である。居室発熱体は伝熱，機器発熱，日射による負荷を想定している。Fig. 4.2.1 の左に示すように居室空気に寄与する熱流として発熱体や放射パネル，壁体表面からの対流熱伝達のみならず，天井裏空気の寄与が考えられる。これには天井放射パネル以外の天井を挟んだ熱伝導 q_{tra} 及び天井裏空気と居室の循環による移流熱伝達 q_{ad} が想定される。

(B)天井裏の熱収支

$$\rho_a c_a V_{ap} \frac{d\theta_{pa}}{dt} = q_{bpc} + q_{tra} + q_{ad} - q_{pas} - q_{paw} \dots\dots\dots (4-4)$$

$$\rho_{pw} c_{pw} V_{pw} \frac{d\theta_{pw}}{dt} = q_{bprw} + q_{paw} - q_{pws} + q_{pwt} \dots\dots\dots (4-5)$$

$$\rho_{bp} c_{bp} V_{bp} \frac{d\theta_{bp}}{dt} = q_{bp} - q_{bpc} - q_{bprs} - q_{bprw} \dots\dots\dots (4-6)$$

(4-4)式は天井裏空気，(4-5)式は天井裏壁面，(4-6)式は天井裏発熱体に関する熱収支式である。天井裏発熱体は照明負荷等を想定している。(4-4)式の q_{tra} ， q_{ad} に関しては，加熱側に寄与するため符号は正となる。

(C) 放射パネルの居室側表面での熱収支

$$\rho_{rp} c_{rp} V_{rp} \frac{d\theta_{rs}}{dt} = q_{ras} + q_{rws} + q_{brrs} - q_{rps} - q_{rsw} \dots\dots\dots (4-7)$$

(4-7)式は放射パネルの居室側表面での熱収支式である。Fig. 4.2.1 右上に示すように居室空気との対流熱伝達，居室発熱体・壁面との放射熱伝達のほかに，放射パネル表面と配管内の冷水との間の熱流，放射パネル表面での居室側と天井裏の間の熱流の熱収支が想定される。

(D) 放射パネルの天井裏側表面での熱収支

$$\rho_{pp} c_{pp} V_{pp} \frac{d\theta_{ps}}{dt} = q_{pas} + q_{pws} + q_{bprs} + q_{rps} - q_{psw} \dots\dots\dots (4-8)$$

(4-8)式は放射パネルの天井裏側表面での熱収支式である。(7)式と同様の考え方で構築された式である。

(E) 放射パネル表面と配管内冷水との熱収支

$$\rho_w c_w V_{wp} \frac{d\theta_w}{dt} = q_{rsw} + q_{psw} - q_{pw} \dots\dots\dots (4-9)$$

(4-9)式は配管内冷水での熱収支式である。放射パネル表面の居室側と天井裏側からの熱流と通水される冷水により処理される熱量との熱収支が想定される。

4.2.2 各熱流項のモデル化

天井放射パネルの冷却能力の予測や天井放射パネル空調における熱負荷計算を可能とするためには，天井放射パネル空調システムを構成する要素の温度を計算する必要がある。Fig. 4.2.1 に示す黒丸（●）は未知数として扱うべき温度の節点を示している。(4-1)～(4-9)式に示す熱流項 q を温度差に関する関数としてモデル化する方法を本項で示す。

第4章 天井放射パネル空調熱収支モデル

4.2.2.1 居室内と天井裏の熱収支

(1)～(3)式及び(4)～(6)式を連立させると下記の(10)式と(11)式を得る。

$$\rho_a c_a V_{ra} \frac{d\theta_{ra}}{dt} + \rho_{rw} c_{rw} V_{rw} \frac{d\theta_{rw}}{dt} + \rho_{br} c_{br} V_{br} \frac{d\theta_{br}}{dt} = q_{br} + q_{rwt} - q_{ras} - q_{rws} - q_{brs} - q_{tra} - q_{ad} \quad (4-10)$$

$$\rho_a c_a V_{ap} \frac{d\theta_{pa}}{dt} + \rho_{pw} c_{pw} V_{pw} \frac{d\theta_{pw}}{dt} + \rho_{bp} c_{bp} V_{bp} \frac{d\theta_{bp}}{dt} = q_{bp} + q_{pwt} - q_{pas} - q_{pws} - q_{prs} + q_{tra} + q_{ad} \quad (4-11)$$

(4-10), (4-11)式の右辺第3項から第5項はパネル表面の熱流であり, 総合熱伝達率とパネル周囲環境とパネル表面との温度差に関する式として, (4-12), (4-13)式のように表せる。

$$q_{ras} + q_{rws} + q_{brs} = \alpha_r n S_p (\theta_{re} - \theta_{rs}) \quad (4-12)$$

$$q_{pas} + q_{pws} + q_{prs} = \alpha_p n S_p (\theta_{pe} - \theta_{ps}) \quad (4-13)$$

これを用い, $\theta_{re} = \theta_{ra}$, $\theta_{pe} = \theta_{pa}$ を仮定し, q_{tra} , q_{ad} を居室空気と天井裏空気の温度差であらわすと

$$\begin{aligned} & \rho_a c_a V_{ra} \frac{d\theta_{ra}}{dt} + \rho_{rw} c_{rw} V_{rw} \frac{d\theta_{rw}}{dt} + \rho_{br} c_{br} V_{br} \frac{d\theta_{br}}{dt} \\ &= q_{br} + q_{rwt} - K_c S_c (\theta_{ra} - \theta_{pa}) - \rho_a c_a Q_a (\theta_{ra} - \theta_{pa}) - \alpha_r n S_p (\theta_{ra} - \theta_{rs}) \quad (4-14) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \rho_a c_a V_{ap} \frac{d\theta_{pa}}{dt} + \rho_{pw} c_{pw} V_{pw} \frac{d\theta_{pw}}{dt} + \rho_{bp} c_{bp} V_{bp} \frac{d\theta_{bp}}{dt} \\ &= q_{bp} + q_{pwt} + K_c S_c (\theta_{ra} - \theta_{pa}) + \rho_a c_a Q_a (\theta_{ra} - \theta_{pa}) - \alpha_p n S_p (\theta_{pa} - \theta_{ps}) \quad (4-15) \end{aligned}$$

を得る。(4-14), (4-15)式の右辺第3項は q_{tra} , 第4項は q_{ad} を表す。最終的に負荷として扱うべき熱流項は, 居室側は q_{br} と q_{rwt} , 天井裏側は q_{bp} と q_{pwt} となる。 θ_{rs} と θ_{ps} は Fig. 4.2.2 のように n 枚連結されているとすると,

$$\theta_{rs} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \theta_{rs,k} \quad (4-16)$$

$$\theta_{ps} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \theta_{ps,k} \quad (4-17)$$

となり, (4-14), (4-15)式は以下のようなになる。

$$\begin{aligned} & \rho_a c_a V_{ra} \frac{d\theta_{ra}}{dt} + \rho_{rw} c_{rw} V_{rw} \frac{d\theta_{rw}}{dt} + \rho_{br} c_{br} V_{br} \frac{d\theta_{br}}{dt} \\ &= q_{br} + q_{rwt} - K_c S_c (\theta_{ra} - \theta_{pa}) - \rho_a c_a Q_a (\theta_{ra} - \theta_{pa}) - \alpha_r S_p \sum_{k=1}^n (\theta_{ra} - \theta_{rs,k}) \quad (4-18) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \rho_a c_a V_{ap} \frac{d\theta_{pa}}{dt} + \rho_{pw} c_{pw} V_{pw} \frac{d\theta_{pw}}{dt} + \rho_{bp} c_{bp} V_{bp} \frac{d\theta_{bp}}{dt} \\ &= q_{bp} + q_{pwt} + K_c S_c (\theta_{ra} - \theta_{pa}) + \rho_a c_a Q_a (\theta_{ra} - \theta_{pa}) - \alpha_p S_p \sum_{k=1}^n (\theta_{pa} - \theta_{ps,k}) \quad (4-19) \end{aligned}$$

4.2.2.2 パネル表面での熱収支

(4-7)～(4-9)式は、以下のようになる。

$$\rho_{rp}c_{rp}V_{rp}\frac{d\theta_{rs}}{dt} = \alpha_r nS_p(\theta_{ra} - \theta_{rs}) - K_{rps}nS_p(\theta_{rs} - \theta_{ps}) - \int_0^{nL_p} K_r(\theta_{rs} - \theta_w)dL \dots\dots\dots (4-20)$$

$$\rho_{pp}c_{pp}V_{pp}\frac{d\theta_{ps}}{dt} = \alpha_p nS_p(\theta_{pa} - \theta_{ps}) + K_{rps}nS_p(\theta_{rs} - \theta_{ps}) - \int_0^{nL_p} K_p(\theta_{ps} - \theta_w)dL \dots\dots\dots (4-21)$$

$$\rho_w c_w V_{wp} \frac{d\theta_w}{dt} = \int_0^{nL_p} K_r(\theta_{rs} - \theta_w)dL + \int_0^{nL_p} K_p(\theta_{ps} - \theta_w)dL - \rho_w c_w Q_w(\theta_{w,0} - \theta_{w,n}) \dots\dots (4-22)$$

(4-20), (4-21)式右辺第1項は前項でのパネル表面と周囲環境との温度差と総合熱伝達率の仮定から得られる。(4-20), (4-21)式右辺第2項は q_{rps} , (4-20)式右辺第3項, (4-22)式右辺第1項は q_{rsw} , (4-21)式右辺第3項, (4-22)式右辺第2項は q_{psw} を表す。 $\theta_{rs} - \theta_w$ 及び $\theta_{ps} - \theta_w$ はパネルの配管に沿って変化すると考えられ, 冷水送水時は配管の入口側から出口側に向けて大きくなると考えられる。そのため, これらの項は配管の長さに沿った関数となる。

パネル配管内冷水とパネル表面間の温度差はパネル入口からの配管距離に依存する関数となると考えられる。ここで, Fig. 4.2.2のようにパネルは1系統に n 枚接続されるとする。パネル1枚におけるパネル配管内冷水とパネル表面温度の温度差は配管距離に関する1次関数になると仮定すると以下の(4-23), (4-24)式を得る。

$$\int_{(k-1)L_p}^{kL_p} K_r(\theta_{rs} - \theta_w)dL = K_r L_p (\theta_{rs,k} - 0.5(\theta_{w,k-1} + \theta_{w,k})) \dots\dots\dots (4-23)$$

$$\int_{(k-1)L_p}^{kL_p} K_p(\theta_{ps} - \theta_w)dL = K_p L_p (\theta_{ps,k} - 0.5(\theta_{w,k-1} + \theta_{w,k})) \dots\dots\dots (4-24)$$

本来ならば, パネル配管内冷水とパネル表面温度の温度差は配管距離に関する対数関数となる¹⁰⁾。ただし, パネル1枚ごとの熱収支を解くにあたって, 1次関数として仮定しても工学的に問題ないと考えられる。以上より, (4-16), (4-17), (4-18)式はパネル1枚ごとの熱収支式に書き換えられ, (4-19), (4-20)式を代入し, 以下の(4-21)～(4-23)式を得る。これらの式はパネル1枚ごとの熱収支式となるため, 1系統内に n 枚接続される場合はそれぞれ n 個の方程式が用意される。

$$\rho_{rp}c_{rp}V_{rp,k}\frac{d\theta_{rs,k}}{dt} = \alpha_r S_p(\theta_{ra} - \theta_{rs,k}) - K_{rps}S_p(\theta_{rs,k} - \theta_{ps,k}) - K_r L_p(\theta_{rs,k} - \theta_{w,ave,k}) \dots\dots\dots (4-25)$$

$$\rho_{pp}c_{pp}V_{pp,k}\frac{d\theta_{ps,k}}{dt} = \alpha_p S_p(\theta_{pa} - \theta_{ps,k}) + K_{rps}S_p(\theta_{rs,k} - \theta_{ps,k}) - K_p L_p(\theta_{ps,k} - \theta_{w,ave,k}) \dots\dots\dots (4-26)$$

$$\rho_w c_w V_{wp,k} \frac{d\theta_{w,k}}{dt} = K_r L_p(\theta_{rs,k} - \theta_{w,ave,k}) + K_p L_p(\theta_{ps,k} - \theta_{w,ave,k}) - \rho_w c_w Q_w(\theta_{w,k} - \theta_{w,k-1}) \dots\dots\dots (4-27)$$

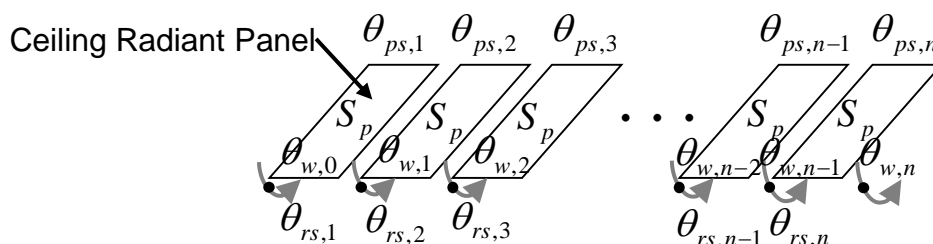


Fig. 4.2.2 複数枚連結された天井放射パネルの各変数定義

4.2.3 熱収支モデルの活用方法と課題

パネル表面温度、冷水温度、居室空気温度、天井裏空気温度を計算するためには、(4-18), (4-19), (4-25), (4-26), (4-27)式を連立させ、方程式を解く必要がある。ここで、各方程式の変数の数は、パネル表面温度は $2n$ 個、冷水温度は $n+1$ 個、空気温度は 2 個、負荷の発熱量は 2 個、その他（流量、パネル面積）は 2 個となり、合計 $3n+7$ 個となる。方程式を解くには、方程式の数は $3n+2$ 個となっているので、 $3n+7$ 個の変数のうち 5 個を入力値とすれば良い。熱収支モデルを用いて、定常時の天井放射パネルの空調性能を予測する方法は第 5 章、非定常時の天井放射パネル空調の熱負荷を計算する方法は第 6 章に詳述する。

天井放射パネルの空調性能予測や熱負荷計算に熱収支モデルを適用するためには、熱収支モデルの仮定が正しいかどうかの検証を行う必要がある。さらに、伝熱係数（熱貫流率や総合熱伝達率、移流量）を実験や理論計算によって明らかにする必要がある。

実験による方法に関しては、2 章において、実大モックアップを用いた実験により天井放射パネルの敷設条件が冷却性能に影響を及ぼすことを明らかにした。これにより、天井放射パネルが冷却した天井裏の空気が居室の負荷の処理に寄与することを示した。ただし、天井放射パネルや空調機の処理熱量と模擬発熱体や実験室周囲の影響を考慮した負荷との収支が一致した精度の高い実験を行うことはでき、マクロでの評価は行うことができたものの、天井放射パネルの数量が多く、天井放射パネル単体でのミクロの評価が困難であり、熱収支モデルの妥当性の評価を行うには適さない。そこで、天井放射パネル単体での熱収支についても評価を可能とする規模を縮小した実験を行った。以下、4.3 節では、実験方法について示す。4.4 節では実験結果から(A)居室内の熱収支、(B)天井裏の熱収支のモデル化方法の妥当性を検証する。4.5 節では、熱伝達率やパネル熱貫流率などの伝熱パラメータの同定方法を示す。さらに、同定した伝熱パラメータを熱収支モデルに組み込み、各熱収支式を連立して解いたパネルの表面温度や空気温度が実験値を再現可能かどうかの検証結果を示す。

また、同定方法が実大実験でも適用可能であることを検証するため、4.6 節では第 2 章の「高開口率放射パネルの冷却能力検証実験」のデータを用いて、伝熱パラメータの同定方法を示す。

4.3 天井放射パネル放熱特性検証基礎実験

4.3.1 実験装置仕様

Fig. 4.3.1 に実験装置の構成を示す。実験装置は内寸 2125 mm×2125mm×1720mm のポリスチレン発泡板 (100 mm 厚) により製作した実験チャンバーボックスと小型冷水製造装置により構成される。実験チャンバーボックス内は上下二つのチャンバーで構成される。その境界は放射パネルにより仕切られており、下部は居室、上部は天井裏を模擬している。Fig. 4.3.2 に実験に用いた天井放射パネルを示す (以下、フラットパネルと称す)。天井放射パネルは細孔を有するアルミパンチングパネル、配管、配管内冷水とアルミパンチングパネルの伝熱を促進させるためのヒートシンクにより構成される。実験チャンバー内には 3 枚のパネルが敷設され、小型冷水製造装置により、冷水が供給される。また、各パネルは連結され、1 系統を構成している。面状発熱体 (60W/個) を天井チャンバー及び居室チャンバーに 4 個ずつ設置し、それぞれのチャンバーに所定の発熱量を与えることができる。発熱量の調整には電圧調整器を用いている。チャンバー内の仕上げは白色のペイントを施しており、放射率は 0.9 と想定している。

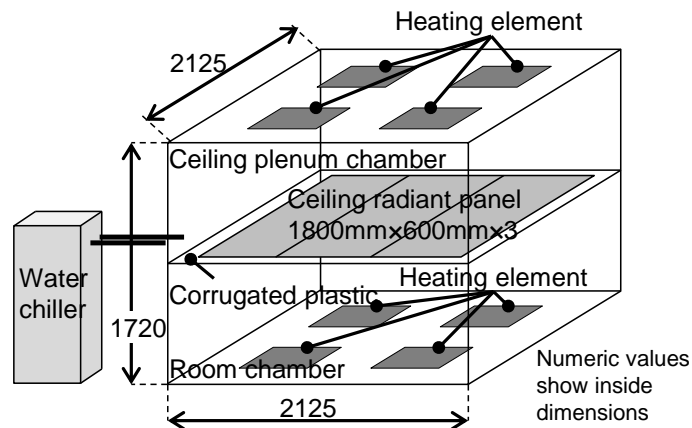


Fig. 4.3.1 実験装置構成

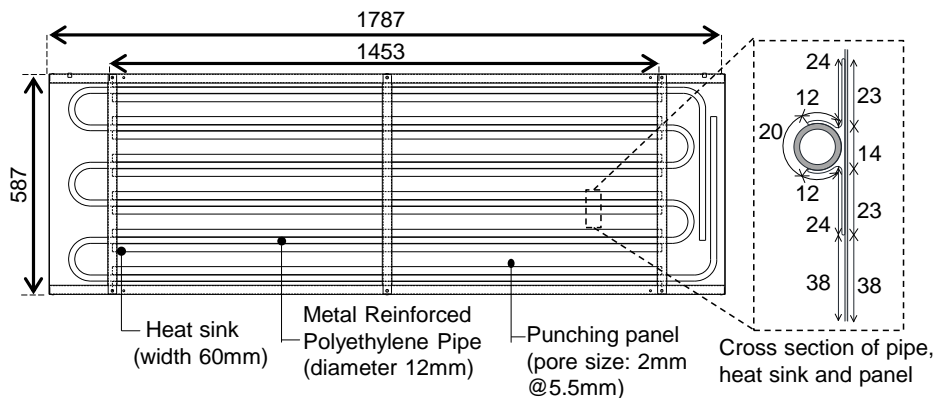


Fig. 4.3.2 実験対象天井放射パネル (フラットパネル)

第4章 天井放射パネル空調熱収支モデル

4.3.2 測定方法

Fig. 4.3.3, Fig. 4.3.4 及び Fig. 4.3.5 にそれぞれ、測定点の断面配置図、測定点の平面配置図及びパネル表面の測定点を示す。また、Table 4.3.1 に本実験における測定項目と測定機器、測定点数を示す。以下のような検討のために測定項目及び位置を選定した。

- ① 天井放射パネルの表面温度については配管内冷水からの伝熱性状の把握
- ② チャンバー内の水平・鉛直温度分布の確認
- ③ 放射パネルー壁面間の放射熱伝達量の把握
- ④ 両チャンバー間の移流量の推定

①に関しては、天井放射パネルの天井裏側においては配管表面とヒートシンク、2つのヒートシンク間のアルミパンチングパネル、居室側においては配管直下、ヒートシンクに接している箇所、ヒートシンクに接していない箇所にそれぞれ設置した。1つのパネルの表面温度の平均値は、Fig. 4.3.2 に示すフラットパネルの各部の寸法より算出したヒートシンク、パネルや配管の面積から按分し算出している。③に関しては、実験チャンバーの内表面温度を測定し、さらに放射収支計を用いた。④に関してはCO₂濃度センサーを実験チャンバー内に各チャンバーと実験チャンバー外に設置した。

Table 4.3.1 Measurement items

Items	Sensor	Number of measurement points
Air temp.	Type T thermocouple	Room: 7, Plenum: 7
Panel sur. temp.		Room: 21, Plenum: 36
Wall sur. temp.		Inside: 14, Outside: 6
Water temp.	Platinum resistance thermometer	4 (Inlet, outlets of each panel)
Radiant heat flux	Net pyrradiometer	Room: 1 Plenum: 1
Flow rate	Electromagnetic flow meter	1
Heating value of heating element	Watt meter	Room: 1 Plenum: 1

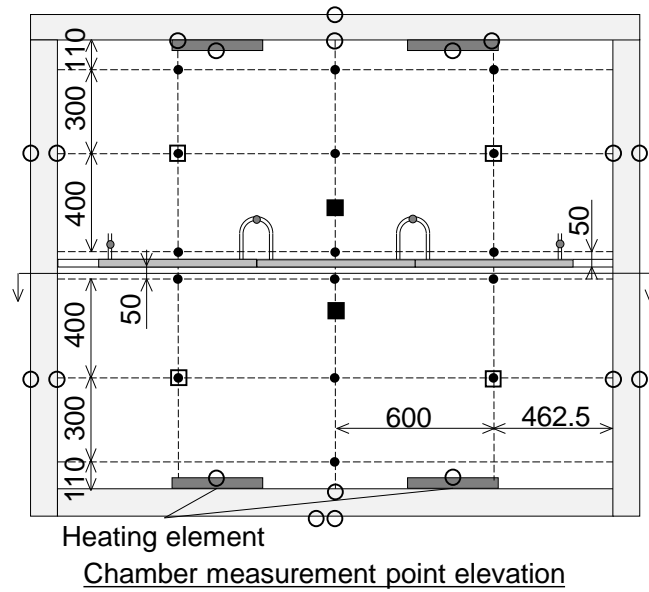


Fig. 4.3.3 測定点断面配置図

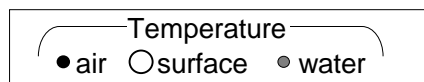
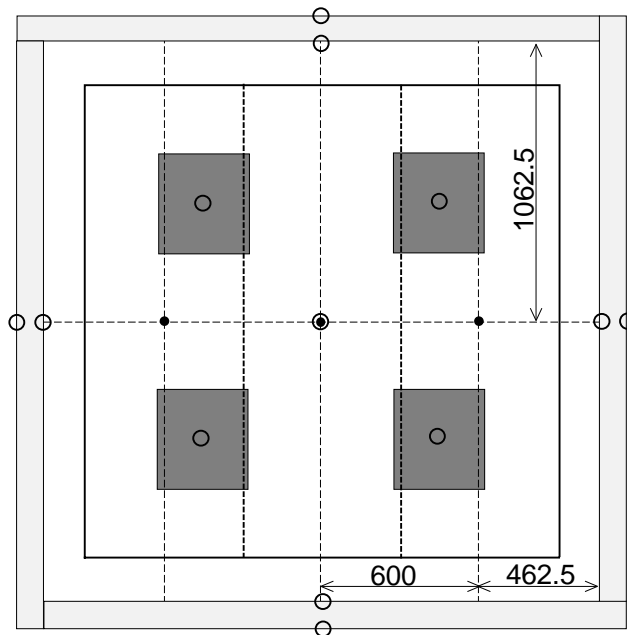


Fig. 4.3.4 測定点平面配置図

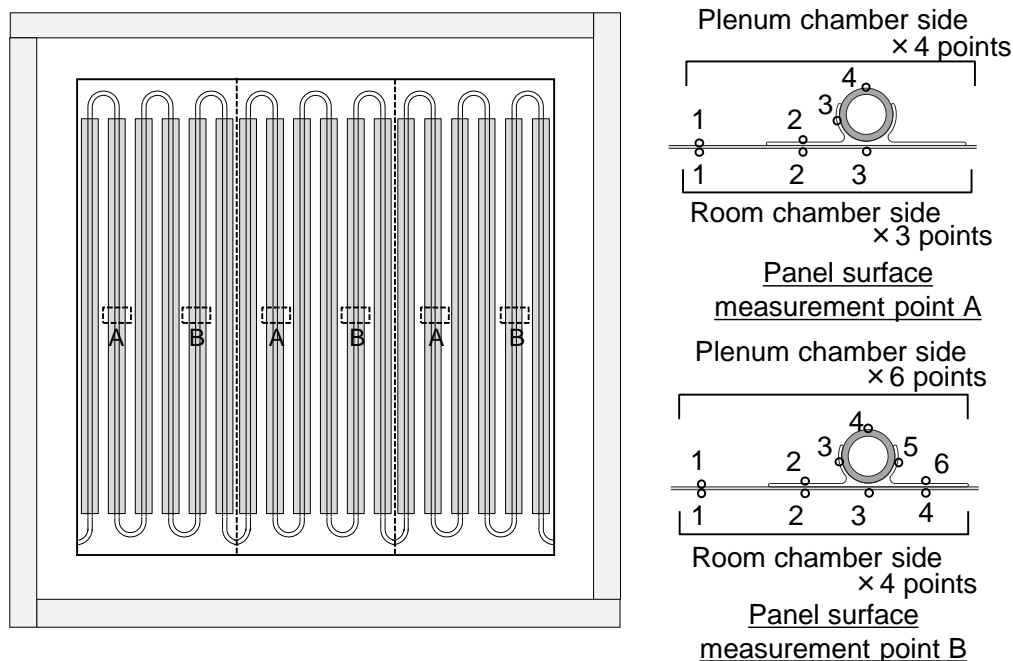


Fig. 4.3.5 パネル表面温度測定点

4.3.3 実験条件

Table 4.3.2 に実験パターンを示す。送水流量によるパネル伝熱特性の変化，天井裏側（上）と居室側（下）の発熱の配分比率（負荷比率）によるパネルの冷却能力の変化を検討するために，5 パターンの流量（1.8, 1.2, 0.6, 0.3, 0.1 l/min），3 パターンの負荷比率（0:10, 2:8, 4:6）の合計 15 パターンの実験を行った。一連の実験を通じて，送水温度と居室チャンバー側の空気温度はそれぞれ，20°C と 26°C となるように制御した。

Table 4.3.2 実験パターン

Case No.	Supply water temp. [°C]	Flow rate [L/min]	Room chamber temp. [°C]	Cooling load distribution rate (plenum : room)
1~5	20	1.8,	26	0:10
6~10		1.2,		2:8
11~15		0.6, 0.3, 0.1		4:6

4.3.4 移流量測定方法

天井裏チャンバーと居室チャンバー間の移流量はトレーサガス濃度減衰法¹¹⁾により、推定した。各チャンバーのトレーサガスの収支に関する関係式は下記のようになる。

$$V_r \frac{dC_r}{dt} = -(C_r - C_p) Q_a \dots\dots\dots (4-28)$$

$$V_p \frac{dC_p}{dt} = (C_r - C_p) Q_a \dots\dots\dots (4-29)$$

(4-28)、(4-29)式を連立させて天井チャンバーと居室チャンバーのトレーサガス濃度の差に関する微分方程式が求められる。

$$\frac{d\Delta C}{dt} = -\alpha Q_a \Delta C \dots\dots\dots (4-30)$$

(ここで $\Delta C = C_r - C_p$, $\alpha = \frac{1}{V_p} + \frac{1}{V_r}$ とする。)

(26)式を解くと、

$$\Delta C(t) = \Delta C_0 \exp(-\alpha Q_a t) \dots\dots\dots (4-31)$$

(ここで、 $\Delta C_0 = \Delta C(0)$ とする。)

が得られる。実験においてはトレーサガスに CO₂ を採用し、(4-31)式を用いて両チャンバー間の移流量を推定した。Fig. 4.3.6 に示すようにチャンバー内の温度が十分に定常に達した状態で、居室チャンバー側に CO₂ ボンベからチューブを通して CO₂ を注入し、チャンバー間で濃度差が確認できた時点で CO₂ の注入を止め、各チャンバーでの CO₂ 濃度の時系列変化を測定した。穴が開いたチューブをチャンバーの壁面中央部に沿って設置し、CO₂ を注入し、上下に拡散させ、ある特定の箇所が高濃度とならないようにしている。ここで得られた濃度差の経時変化を(4-31)式で近似し、移流量 Q_a を求めることができる。なお、実験装置は十分に気密が確保できており、実験装置外からの漏気は無視できる程度であることを確認している。Fig. 4.3.7 に CO₂ 濃度の経時変化と移流量 Q_a の同定結果の一例を示す。ここで CO₂ 濃度は各チャンバーの2か所の測定点の平均値を示している。

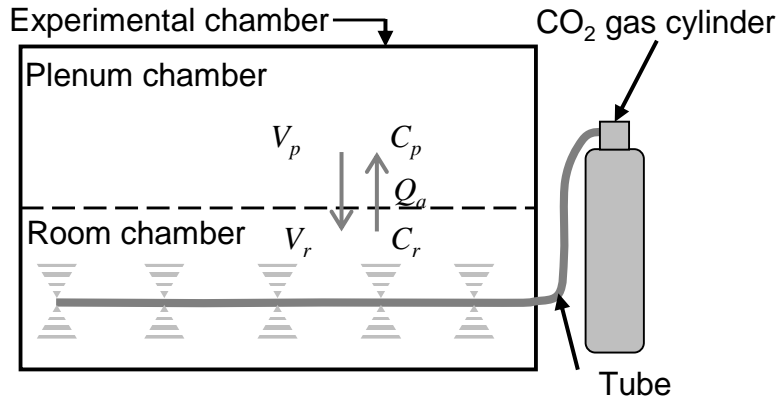


Fig. 4.3.6 居室-天井裏間移流量測定方法

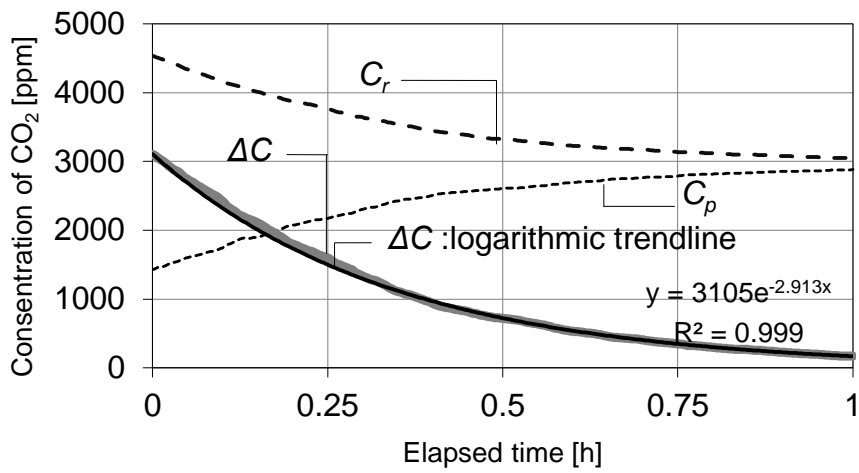


Fig. 4.3.7 移流量同定結果

4.4 実験結果

本節では天井放射パネル放熱特性検証実験の分析結果を示す。ここでは、天井放射パネルの処理熱量の天井裏と居室の負荷比率と関係と熱収支の分析と熱収支モデルの妥当性の検証について示す。

4.4.1 温度分布測定結果

Fig. 4.4.1 に実験チャンバー内の Case 1 の温度分布を示す。居室チャンバーと天井チャンバーの温度差が 2.4~3.0 °C となっている。発熱がないため、天井チャンバーが居室チャンバーよりも温度が低くなっている。また、床面表面が空気よりも温度が低く、パネルからの放射熱伝達の影響により、冷却されていることが考えられる。

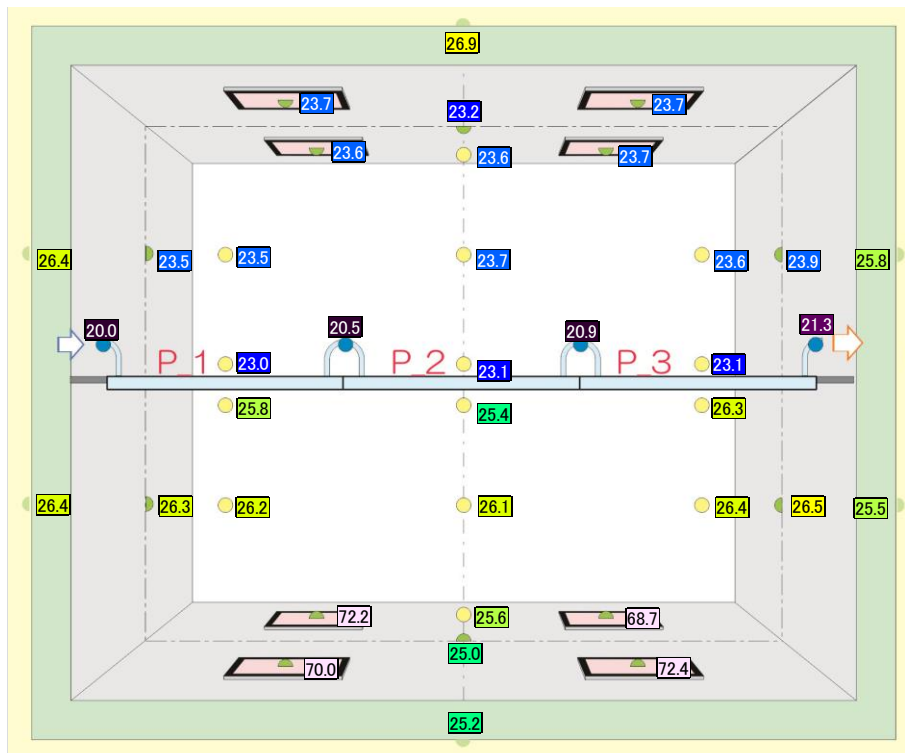


Fig. 4.4.1 実験チャンバー内温度分布

第4章 天井放射パネル空調熱収支モデル

4.4.2 パネル表面・冷水温度分布

Fig. 4.4.2 に放射パネルの表面温度及び配管内の冷水温度の分布を示す。X 軸は、1 枚目の配管入口を起点（原点）として放射パネル内のアルミ三層管の長さとしている。流量が大きい時（Case 1: 1.8 l/min）は水温の変化量と表面温度の変化量がほぼ等しくなっているが、流量が小さい時（Case 5: 0.1 l/min）は表面温度が水温に近接しており、システムの出口に近づくほど処理熱量が小さくなっていることが考えられる。

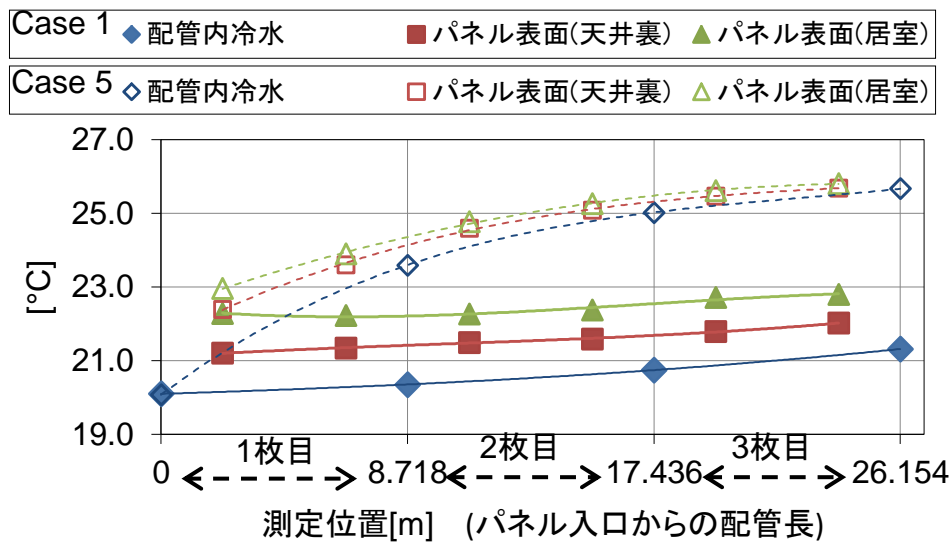


Fig. 4.4.2 放射パネルの表面温度及び配管内の冷水温度の分布

4.4.3 処理熱量と流量の関係

Fig. 4.4.3 に放射パネル処理熱量と流量の関係を示す。1.2 l/min 以上において流量に対する処理熱量の変化が緩やかになっている。送水流量のスペックを決めるにあたって、放射パネルを 3 枚連結した時の最適な上限流量が 1.2~1.8 l/min 付近にあることが示唆される。

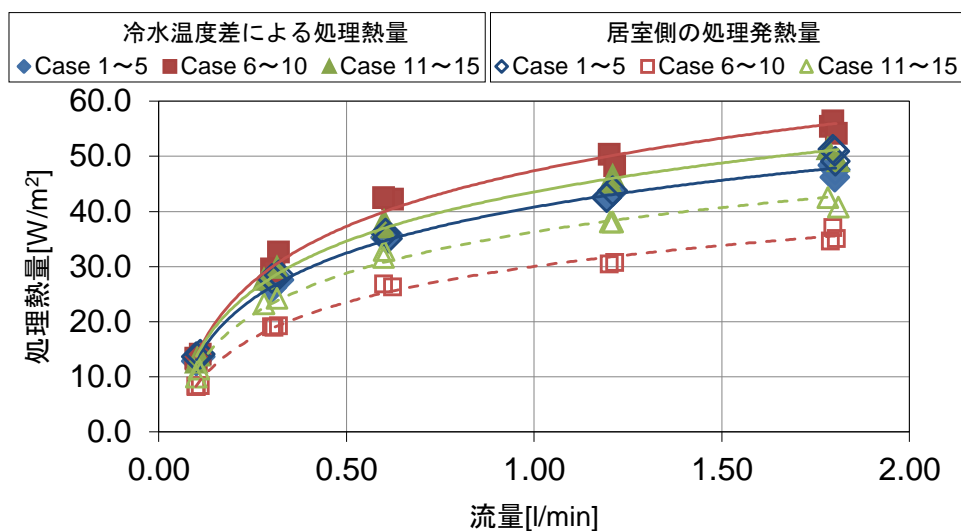


Fig. 4.4.3 処理熱量と流量の関係

4.4.4 処理熱量と天井裏と居室の負荷比率の関係

Fig. 4.4.4 に EN14240¹⁾ に準拠して、居室空気－冷水温度差と天井放射パネルの処理負荷の関係を示す。冷水温度は出入口の平均値を用いている。Y 軸には冷水の温度差により算出した熱量と電力量計により測定した居室側の模擬負荷の発熱量（居室側の負荷）をプロットしている。天井裏の負荷の割合が大きくなるに従い、天井放射パネルが処理する熱量は大きくなるが、居室側の負荷は小さくなることから分かる。このように、居室と天井裏の負荷比率が変化することで、放射パネルの処理する居室側の負荷が変化する。これにより、居室の空気温度が同一条件であっても、天井裏の条件により、処理できる居室の負荷が異なり、放射パネルにより処理される負荷を把握するうえで居室側の負荷のみならず、天井裏の負荷の影響も考慮することが必要であることが示した。

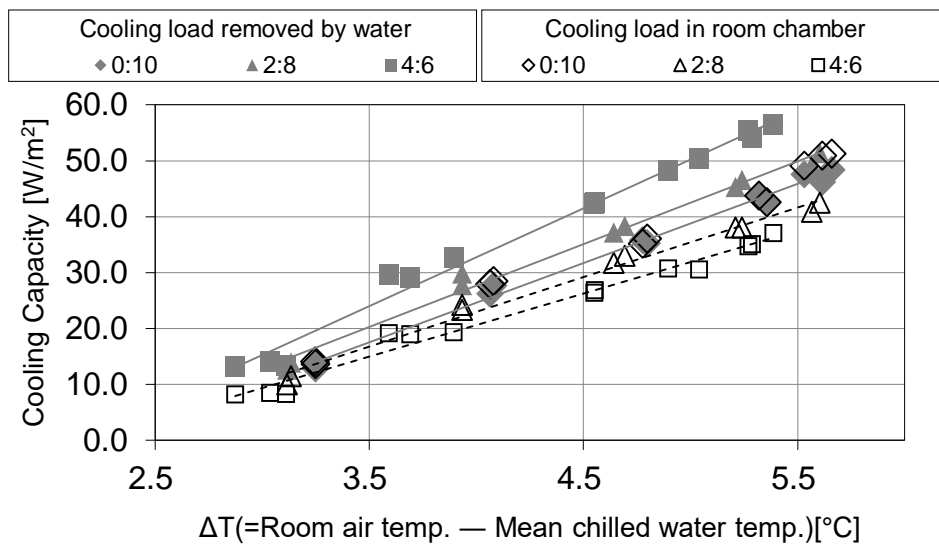


Fig. 4.4.4 居室空気－冷水温度差と天井放射パネルの処理負荷の関係

第4章 天井放射パネル空調熱収支モデル

Fig. 4.4.5 に居室側処理発熱量と居室と天井裏の空気温度差との相関を示した散布図を示す。天井裏の空気が居室空気よりも低いほど（X軸の値が大きいほど）、処理可能な負荷が大きくなることが示されており、天井裏空気が居室側の負荷の処理に寄与していることが示唆される。

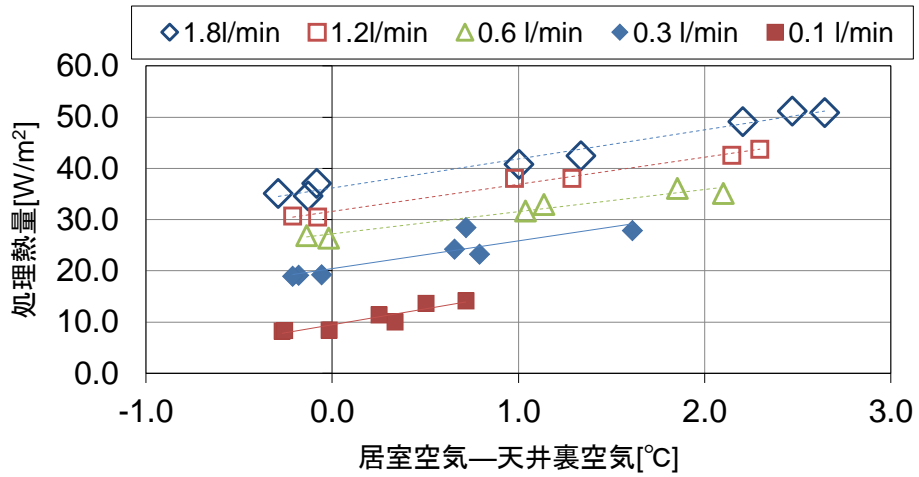


Fig. 4.4.5 居室側処理発熱量と居室と天井裏の空気温度差との相関

4.4.5 熱収支式の妥当性の検証

本実験において各温度が十分定常状態に達しているときの実験結果を採用している。そのため、熱収支モデルにおける(A)居室内及び(B)天井裏の熱収支式の妥当性の検証を行うにあたって、各熱収支式においても定常時であることより、左辺（時間微分項）はゼロである条件での検証を行うこととした。再度、時間微分項をゼロとした熱収支式を下記に示す。

$$0 = q_{br} + q_{rvt} - q_{ras} - q_{rws} - q_{brs} - q_{tra} - q_{ad} \dots\dots\dots (4-10)'$$

$$0 = q_{bp} + q_{pvt} - q_{pas} - q_{pws} - q_{prrs} + q_{tra} + q_{ad} \dots\dots\dots (4-11)'$$

Fig. 4.4.6 に各居室と天井裏の負荷比率での

- a: 放射パネル表面への熱流4成分
- b: 居室の負荷の処理に寄与する熱流
- c: 模擬負荷の発熱量
- d: 冷水温度差による処理熱量

を示す。aのうち、放射成分 ($q_{rws}+q_{brs}$ と $q_{pws}+q_{prrs}$) は放射収支計による測定値より求め、対流成分 (q_{ras} と q_{pas}) は(4-32), (4-33)式により推定した。その際の対流熱伝達率は(4-34), (4-35)式の通りに設定した¹²⁾。

$$q_{ras} = \alpha_{r,c} S_p (\theta_{ra} - \theta_{rs}) \dots\dots\dots (4-32)$$

$$q_{pas} = \alpha_{p,c} S_p (\theta_{pa} - \theta_{ps}) \dots\dots\dots (4-33)$$

$$\alpha_{r,c} = 5.89 + 0.0148(\theta_{ra} - \theta_{rs})^{1.87} \dots\dots\dots (4-34)$$

$$\alpha_{p,c} = 2.18 \dots\dots\dots (4-35)$$

bの q_{ad} に関しては後述する移流熱伝達係数（4.5節）と天井裏空気と居室空気の温度差により求め、 q_{tra} に関しては天井放射パネル以外の天井材（プラスチックダンボール）の熱物性値を文献値¹³⁾から与えて、天井裏空気と居室空気の温度差により求めた。dの q_{pw} に関しては、冷水温度差と流量から算出した。

それぞれの実験パターンにおいてパネルの放熱4成分の合計(a)、上下発熱量(c)の合計及びパネル処理熱量(d)が概ね等しく、放射パネルからの放熱量の測定及び推定が高い精度で行われている。また、定常状態での測定が行われていると考えられる。

一方で、放射パネルの放熱量と負荷の発熱量の収支関係に着目すると、天井裏と居室の負荷比率が0:10と2:8において、aの放射パネルの居室側表面への熱流と居室側の発熱量の収支が一致しない。ここで居室の負荷の処理に寄与する熱流(b)と居室側の負荷を比較すると概ね等しくなっている。一方で4:6において、放射パネルの天井裏と居室側表面への熱流と発熱量が概ね等しくなっている。ただし、天井裏と居室の温度差が小さかったため、天井裏の空気が居室側の負荷処理に寄与していない。このように放射パネルにより冷却された天井

第4章 天井放射パネル空調熱収支モデル

裏の空気が居室の負荷の処理に寄与することが示され、熱収支モデルを簡略化した際の居室内と天井裏の熱収支式((4-10), (4-11)式)の妥当性が確認できた。

上記をまとめると Fig. 4.4.7 のようになり、放射パネルの冷水の温度差による処理熱量とパネルの放熱量や負荷の熱収支のみならず、天井裏と居室の空気間の熱伝達の考慮の必要性を示した。

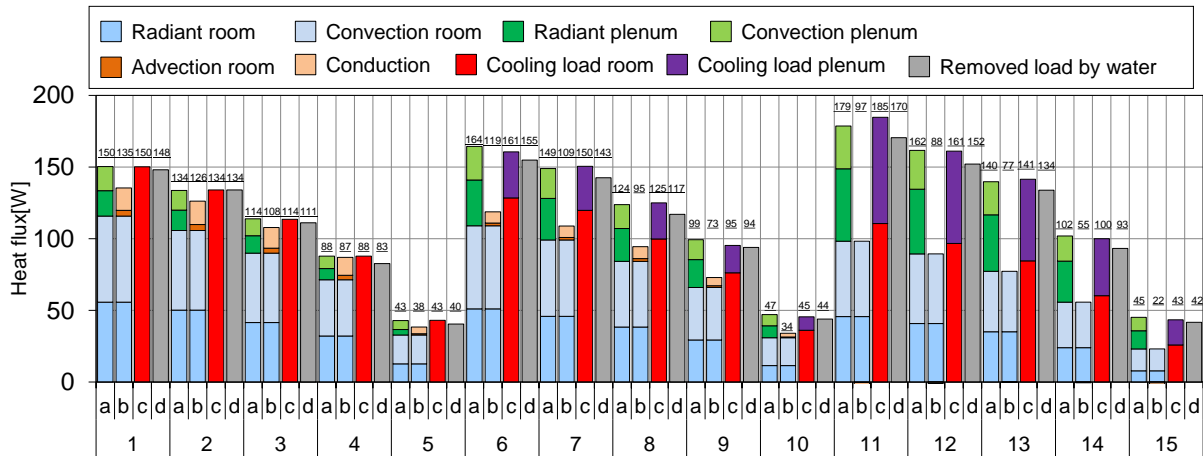


Fig. 4.4.6 各熱量収支

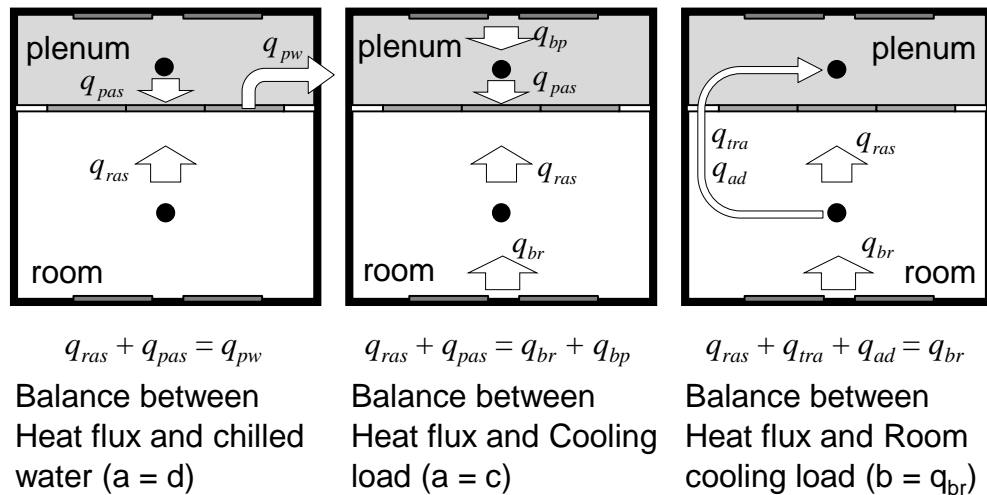


Fig. 4.4.7 熱収支の模式図

4.5 基礎実験データを用いた伝熱係数の同定

4.5.1 総合熱伝達率

Fig. 4.5.1 に熱伝達量と空気－パネル表面温度差の関係（居室側，天井裏側）を示す。ここで q_{ras} は Fig. 4.4.6 の「Radiant room」と「Convection room」の合計値である。同様に q_{pas} は「Radiant plenum」と「Convection plenum」の合計値である。これらの散布図の傾きが総合熱伝達率となるが，原点を通る1次式で近似すると傾きが居室側で $11.2\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ となり，一般的に用いられる総合熱伝達率 $9.0\text{W/m}^2\cdot\text{K}^{14)}$ よりも大きい。これは，放射パネルが冷却面となり，壁面や発熱体表面との温度差が大きく，放射と対流の熱伝達が通常の壁面よりも大きくなることによると考えられる。これに対して，天井裏側では $7.1\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ となり，一般的に用いられる下向き熱流の総合熱伝達率 $7.0\text{W/m}^2\cdot\text{K}^{14)}$ と概ね一致する。

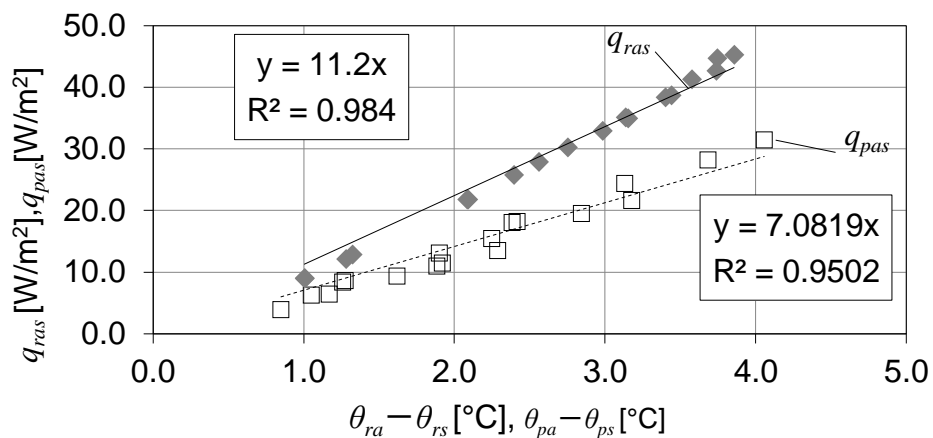


Fig. 4.5.1 熱伝達量と空気－パネル表面温度差の関係

4.5.2 移流熱伝達係数

Fig. 4.5.2 と Fig. 4.5.3 は天井裏と居室の間の移流量およびそれによる熱伝達量を示す (4.4 項の実験結果)。移流量が天井裏と居室との温度差に依存するものの、この温度差範囲では移流熱伝達率はその温度差の一次関数として近似できると判断される。そこで、単位温度差あたりの移流熱伝達量[W/K]を表すパラメータとして、移流熱伝達係数 α_{ad} を定義し、実験データから同定した (同定結果: $\alpha_{ad}=1.84\text{W/K}$)。以上より、定常時の(4-14), (4-15)式はそれぞれ(4-36), (4-37)式のように表される。なお、ここで測定された移流量は、放射パネルの細孔を通じた天井裏と居室の空気の循環によるものと考えられる。

$$0 = q_{br} + q_{rvt} - K_c S_c (\theta_{ra} - \theta_{pa}) - \alpha_{ad} (\theta_{ra} - \theta_{pa}) - \alpha_r n S_p (\theta_{ra} - \theta_{rs}) \dots\dots\dots (4-36)$$

$$0 = q_{bp} + q_{pvt} + K_c S_c (\theta_{ra} - \theta_{pa}) + \alpha_{ad} (\theta_{ra} - \theta_{pa}) - \alpha_p n S_p (\theta_{pa} - \theta_{ps}) \dots\dots\dots (4-37)$$

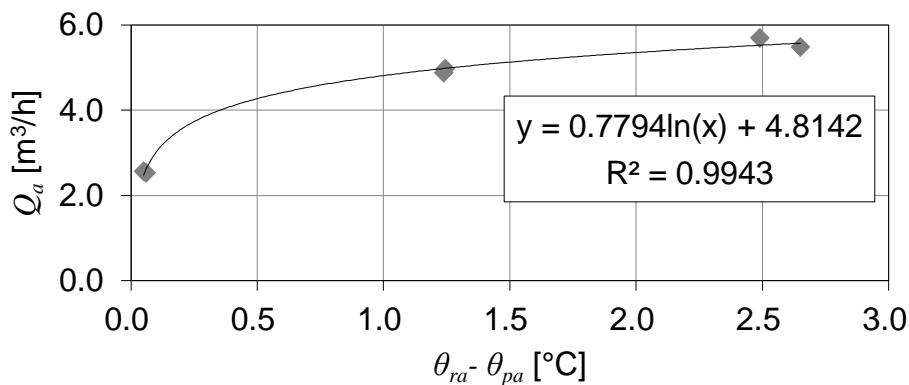


Fig. 4.5.2 天井裏と居室の温度差と移流量の関係

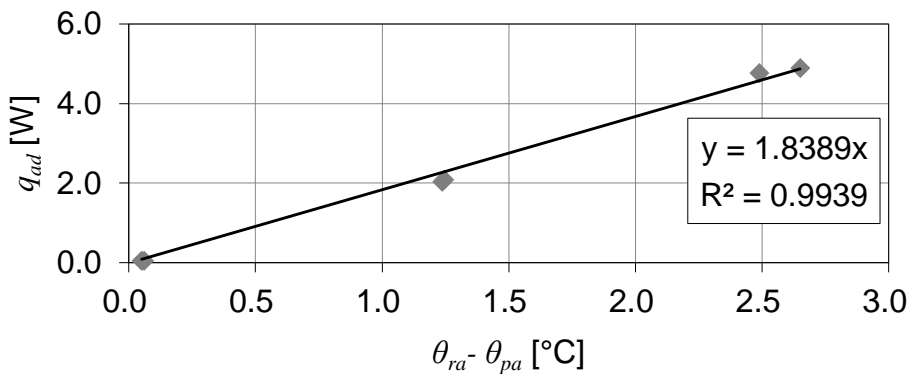


Fig. 4.5.3 天井裏と居室の温度差と移流熱伝達量の関係

4.5.3 パネル熱貫流率

パネル熱貫流率はパネルの材質，形状によって決まるパネルの表面と冷水との熱交換に関する伝熱係数である。パネルの形状を有限要素法等でモデル化し，パネルの材質に応じて物性値を設定すれば，実験を経ずに理論的に求めることができると考えられる。しかし，配管とヒートシンクの間隙の熱抵抗や低流量での配管と冷水間の熱伝達率など未知となる物性値があるため，理論的に求めるにしても現実に即して補正する必要がある。ここでは熱回路網モデルで放射パネルをモデル化して，熱貫流率を求め，実験値により補正する方法を示す。ここで示す方法は①配管-パネル間の空隙熱抵抗の同定，②低流量域での配管-冷水間熱伝達率の同定の2段階でパネル熱貫流率を求める。

4.5.3.1 配管-パネル間の空隙熱抵抗の同定

下記の2つのステップを経て，空隙熱抵抗 R を同定する。

① 空隙熱抵抗とパネル熱貫流率の関係式の導出

流量が比較的大きい条件での配管とパネル間の空隙熱抵抗とパネル熱貫流率の関係式を放射パネルの熱回路網モデルにより導出する。まず，パネル形状や各部材の熱抵抗値（空隙熱抵抗以外，文献値を参照）を考慮に入れて，詳細モデル（Detailed model）を作成する（Fig. 4.5.4 左）。詳細モデルを3つの節点（配管内冷水，居室側表面，天井裏側表面）と各々を接続する抵抗の簡易モデル（Simplified model）に縮約し，得られた抵抗値の逆数がパネル熱貫流率となる（Fig. 4.5.4 右）。このように縮約することで，計算負荷の軽減も可能となる。配管-冷水間熱伝達率は Gnielinski の式¹⁰⁾を用いて推定する。ただし，空隙熱抵抗 R が未知であるためパネル熱貫流率は求めることはできない。そこで詳細モデルを未知数である空隙熱抵抗 R を残して，縮約する（Fig. 4.5.4 中央 Sub-simplified model）。こうして得られたパネル熱貫流率と空隙熱抵抗 R の関係式を下記に示す。 K_{rps} に関しては，パネルの天井裏側表面と居室側表面との熱貫流率であり，配管とヒートシンク間の熱抵抗に依存せず，一定値となる。これは，詳細モデル（Detailed model）から簡易モデル（Simplified model）に縮約する際に求められる。

$$K_r = 1/(a_r R + b_r) \dots\dots\dots (4-38)$$

ここで $a_r = 599.395, b_r = 3.316$

$$K_p = 1/(a_p R + b_p) + 1/c_p \dots\dots\dots (4-39)$$

ここで $a_p = 40.545, b_p = 0.213, c_p = 0.304$

$$K_{rps} = 8400 \dots\dots\dots (4-40)$$

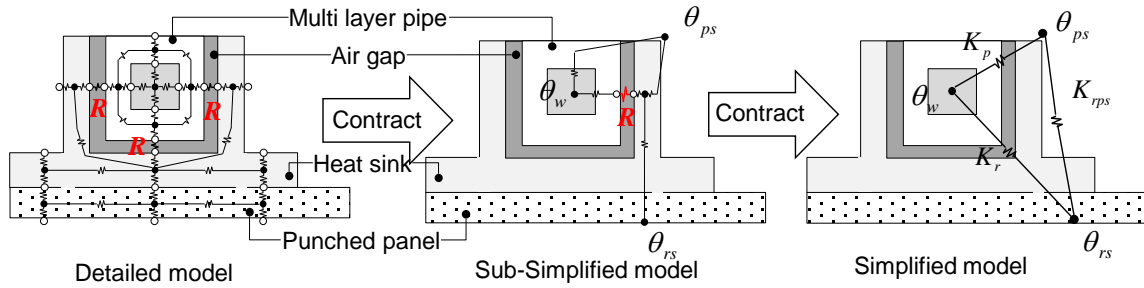


Fig. 4.5.4 天井放射パネルの熱貫流率の同定方法①

② 実験結果を用いた空隙熱抵抗の同定

空隙熱抵抗とパネル熱貫流率の関係式を用いて、実験で得られるパネル処理熱量、冷水温度とパネル表面温度より、空隙熱抵抗を同定する。(4-27)式を変形すると下式を得る。

$$q_{pw}/L_p = K_r (\theta_{rs} - \theta_{w,ave}) + K_p (\theta_{ps} - \theta_{w,ave}) \dots\dots\dots (4-41)$$

(4-41)式の K_r, K_p 以外の項は実験値及び与条件である。(4-38), (4-39)式を(4-41)式に代入し、実験結果と合致するように非線形回帰分析を行うことで以下の空隙熱抵抗 R を得る。

$$R = 0.023 \dots\dots\dots (4-42)$$

Fig. 4.5.5 は表面－冷水温度差とパネル処理熱量の関係の実験結果と同定された R により計算した結果の比較したものである。高い精度で同定できていることが示されている。

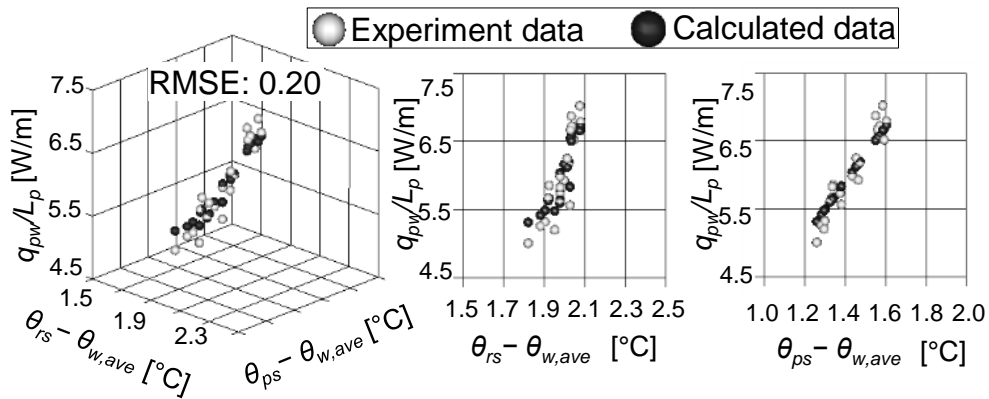


Fig. 4.5.5 空隙熱抵抗 R 同定結果

4.5.3.2 低流量域での配管-冷水間熱伝達率の同定

流量が小さい条件（1.7 l/min 以下）においては，検証対象としたフラットパネルの配管径（12mm φ）においてレイノルズ数が 3000 以下となり，層流と乱流の遷移域となる。このため配管－冷水間熱伝達率は既存の実験式による推定は困難である¹⁰⁾。そこで，前項の方法と同様のアプローチで冷水－配管間熱伝達率を同定する。

① 配管－冷水間熱伝達率とパネル熱貫流率の関係式の導出

前節と同様の方法で熱回路網を用いて熱貫流率と配管－冷水間熱伝達率の関係式を導出する（Fig. 4.5.6）。空隙熱抵抗 R に関しては前節で求められた数値を用いる。こうして得られたパネル熱貫流率と配管－冷水間熱伝達率 α の関係式は下記となる。

$$K_r = 1 / (d_r / \alpha + e_r) \dots\dots\dots (4-43)$$

ここで $d_r = 550.156$, $e_r = 16.426$

$$K_p = 1 / (d_p / \alpha + e_p) \dots\dots\dots (4-44)$$

ここで $d_p = 41.411$, $e_p = 0.205$

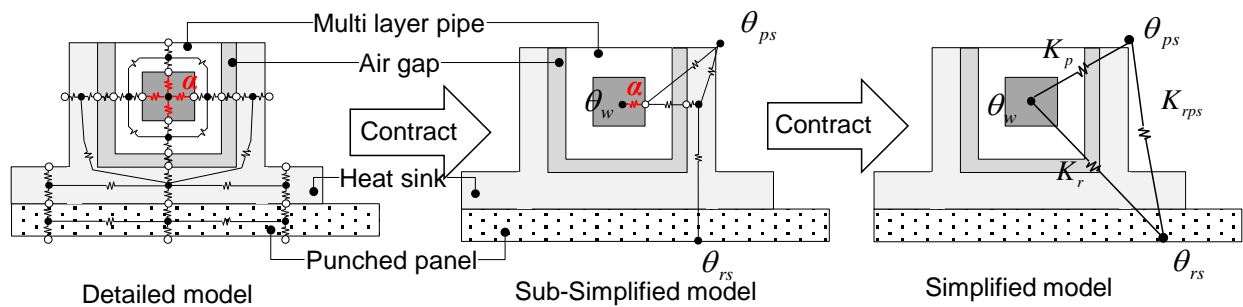


Fig. 4.5.6 天井放射パネル熱貫流率の同定方法②

第4章 天井放射パネル空調熱収支モデル

②実験結果を用いた冷水－配管熱伝達率の同定

前項と同様の方法で同定した結果を Fig. 4.5.7 に示す。参考に流量 1.2L/min (レイノルズ数：2100) 以下での層流条件での既存の実験式²⁰⁾による熱伝達率を示している。低流量条件 (0.1, 0.3, 0.6, 1.2 l/min) での同定結果は、実線で示す既存の実験式による層流条件での熱伝達率よりも大きい。また、破線で示す既存の実験式による乱流条件での熱伝達率の延長線上に熱伝達率の同定結果がプロットされている。放射パネルの配管の経路が曲りを有しているため、低流量域でも乱流となっており、このような結果になったと考えられる。以上より妥当な同定結果である。

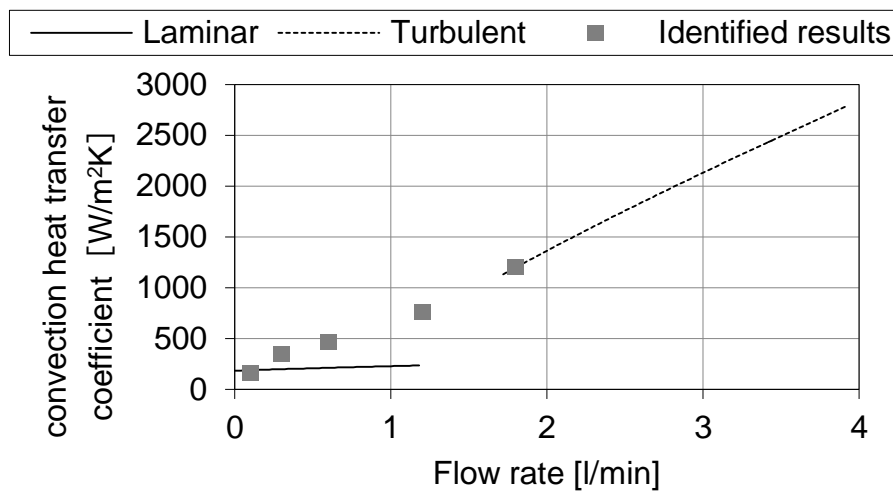


Fig. 4.5.7 層流域の配管-冷水間熱伝達率の同定結果

4.5.4 パネル熱貫流率同定結果

Fig. 4.5.8 に前項で得られた空隙熱抵抗、配管－冷水間熱伝達率を用いて計算したパネル熱貫流率を示す。それぞれ流量に依存して変化することが示されており、流量に依存する関数として扱うことができる。また、 K_p の方が K_r よりも大きくなっており、天井裏側に配管が露出しており、冷水と天井裏側表面との熱伝達がしやすい形状となっていることが、この差に表れている。

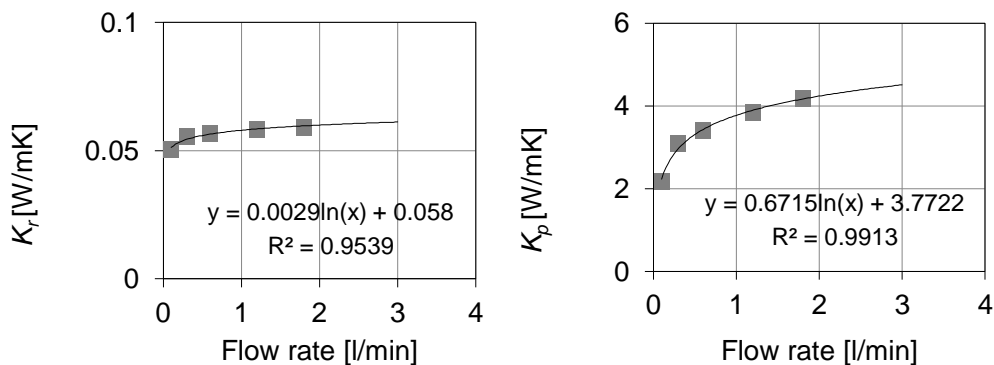


Fig. 4.5.8 パネル熱貫流率同定結果 (左： K_r 、右： K_p)

4.5.5 パラメータ同定結果の妥当性検証

4.5.5.1 各パラメータ同定結果

以上により同定された各種伝熱係数を Table 4.5.1 に示す。さらに放射パネルの仕様と実験チャンバーの形状から設定できる面積などの数値、文献値より推定した放射パネル以外の天井の熱貫流率を Table 4.5.2 に示す。これらの伝熱係数を熱収支モデルにおける熱収支式の温度に乗ぜられる係数に代入し、各熱収支式を連立させて、パネル表面温度や居室空気温度、天井裏空気温度などの実験結果を再現できるかどうかを確認する。

Table 4.5.1 熱収支モデルにおける各種伝熱係数同定結果

Variable	Definition	Numeric value or Equation	Unit
α_r	General heat transfer coefficient on panel surface of room side	11.2	W/m ² ·K
α_p	General heat transfer coefficient on panel surface of plenum side	7.1	W/m ² ·K
α_{ad}	Advection heat transfer coefficient	1.84	W/ K
K_r	Heat conductance from room panel surface to water in tube	$0.058+0.0029\log_n(Q_w)$	W/m·K
K_p	Heat conductance from plenum panel surface to water in tube	$3.772+0.6715 \log_n(Q_w)$	W/m·K
K_{rps}	Heat conductance of panel from room to plenum	8400	W/m ² ·K

Table 4.5.2 熱収支モデルにおける各種定数

Variable	Definition	Numeric value	Unit
n	Number of panels in one circuit	3	-
S_p	Effective area of a ceiling radiant panel	0.85	m ²
L_p	Tube length of a ceiling radiant panel	8.72	m
K_c	Heat conductance of ceiling except ceiling radiant panel	3.18	W/m ² ·K
S_c	Area of ceiling except ceiling radiant panel	1.91	m ²

第4章 天井放射パネル空調熱収支モデル

4.5.5.2 連立方程式による空気温度・パネル表面温度の解法

実験結果が熱収支モデルにより再現可能かどうかの確認のために、熱収支式を連立させて、未知数となる温度を計算する方法について示す。定常時の熱収支式を再度、下記に示す。

$$0 = q_{br} + q_{rwt} - K_c S_c (\theta_{ra} - \theta_{pa}) - \alpha_{ad} (\theta_{ra} - \theta_{pa}) - \alpha_r S_p \sum_{k=1}^n (\theta_{ra} - \theta_{rs,k}) \dots\dots\dots (4-45)$$

$$0 = q_{bp} + q_{pwt} + K_c S_c (\theta_{ra} - \theta_{pa}) + \alpha_{ad} (\theta_{ra} - \theta_{pa}) - \alpha_p S_p \sum_{k=1}^n (\theta_{pa} - \theta_{ps,k}) \dots\dots\dots (4-46)$$

$$0 = \alpha_r S_p (\theta_{ra} - \theta_{rs,k}) - K_{rps} S_p (\theta_{rs,k} - \theta_{ps,k}) - K_r L_p \{ \theta_{rs,k} - 0.5(\theta_{w,k} + \theta_{w,k-1}) \} \dots\dots\dots (4-47)$$

$$0 = \alpha_p S_p (\theta_{pa} - \theta_{ps,k}) + K_{rps} S_p (\theta_{rs,k} - \theta_{ps,k}) - K_p L_p \{ \theta_{ps,k} - 0.5(\theta_{w,k} + \theta_{w,k-1}) \} \dots\dots\dots (4-48)$$

$$0 = K_r L_p \{ \theta_{rs,k} - 0.5(\theta_{w,k} + \theta_{w,k-1}) \} + K_p L_p \{ \theta_{ps,k} - 0.5(\theta_{w,k} + \theta_{w,k-1}) \} - \rho_w c_w Q_w (\theta_{w,k} - \theta_{w,k-1}) \dots\dots\dots (4-49)$$

ここで同定した各パラメータの精度の妥当性の検証を行うにあたって、熱収支モデルにおける各熱収支式を連立一次方程式として、居室側負荷 q_{br} 、天井裏側負荷 q_{bp} 、流量 Q_w 、送水温度 $\theta_{w,0}$ を入力条件とし、未知数の居室の空気温度 θ_{ra} 、天井裏の空気温度 θ_{pa} 、居室側パネル表面温度 θ_{rs} 、天井裏側パネル表面温度 θ_{ps} を解くことを試みる。(4-41)式と(4-42)式は居室と天井裏の空気の平均空気温度で代表させ、パネル表面温度 θ_{rs} と θ_{ps} は連結されたパネルごと上記に示した(4-43)～(4-45)式は、天井放射パネル放熱特性検証基礎実験での条件では天井放射パネルを3枚連結としていることから、 $n=3$ となり、それぞれ3つの熱収支式が立式される。これより連立11元1次方程式を解くことになる。以下に行列表記にて方程式を示す。

$$\begin{pmatrix} A & B & C & C & C & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ B & A' & 0 & 0 & 0 & D & D & D & 0 & 0 & 0 \\ C & 0 & E & 0 & 0 & F & 0 & 0 & G & 0 & 0 \\ C & 0 & 0 & E & 0 & 0 & F & 0 & 0 & G & 0 \\ C & 0 & 0 & 0 & E & 0 & 0 & F & 0 & 0 & G \\ 0 & D & F & 0 & 0 & H & 0 & 0 & I & 0 & 0 \\ 0 & D & 0 & F & 0 & 0 & H & 0 & I & I & 0 \\ 0 & D & 0 & 0 & F & 0 & 0 & H & 0 & I & I \\ 0 & 0 & J & 0 & 0 & K & 0 & 0 & L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J & 0 & 0 & K & 0 & M & L & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & J & 0 & 0 & K & 0 & M & L \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_{ra} \\ \theta_{pa} \\ \theta_{rs,1} \\ \theta_{rs,2} \\ \theta_{rs,3} \\ \theta_{ps,1} \\ \theta_{ps,2} \\ \theta_{ps,3} \\ \theta_{w,1} \\ \theta_{w,2} \\ \theta_{w,2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} q_{br} + q_{rwt} \\ q_{pr} + q_{pwt} \\ 0.5K_r L_p \theta_{w,0} \\ 0 \\ 0 \\ 0.5K_p L_p \theta_{w,0} \\ 0 \\ 0 \\ \{ \rho_w c_w Q_w - 0.5L_p (K_r + K_p) \} \theta_{w,0} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \dots\dots\dots (4-50)$$

$$A = K_c S_c + \alpha_{ad} + \alpha_r n S_p \dots\dots\dots (4-51)$$

$$A' = K_c S_c - \alpha_{ad} - \alpha_p n S_p \dots\dots\dots (4-52)$$

$$B = -K_c S_c - \alpha_{ad} \dots\dots\dots (4-49)$$

$$C = -\alpha_r S_p \dots\dots\dots (4-50)$$

$$D = -\alpha_p S_p \dots\dots\dots (4-46)$$

$$E = \alpha_r S_p + K_{rps} S_p + K_r L_p \dots\dots\dots (4-47)$$

$$F = -K_{rps} S_p \dots\dots\dots (4-48)$$

$$G = -0.5 K_r L_p \dots\dots\dots (4-49)$$

$$H = \alpha_p S_p + K_{rps} S_p + K_p L_p \dots\dots\dots (4-50)$$

$$I = -0.5 K_p L_p \dots\dots\dots (4-51)$$

$$J = -K_r L_p \dots\dots\dots (4-52)$$

$$K = -K_p L_p \dots\dots\dots (4-53)$$

$$L = \rho_w c_w Q_w + 0.5 (K_r L_p + K_p L_p) \dots\dots\dots (4-54)$$

$$M = -\{ \rho_w c_w Q_w - 0.5 (K_r L_p + K_p L_p) \} \dots\dots\dots (4-55)$$

このように伝熱パラメータを得ることができれば、居室や天井裏の空気温度やパネル表面温度を解くことができる。次節に(4-50)式の実験で得られる右辺を代入して、左辺の空気温度やパネル表面温度、冷水温度を解いた結果を示し、実験で得られた値と比較し、同定した伝熱パラメータの妥当性の検証結果を示す。

第4章 天井放射パネル空調熱収支モデル

4.5.6 空気温度

Fig. 4.5.9 に居室・天井裏の空気温度及びパネルの表面温度の計算値と実験値の比較を示す。ここで示すように、実験値の傾向を概ね再現しており、空気温度の計算にある程度の精度が確保できている。

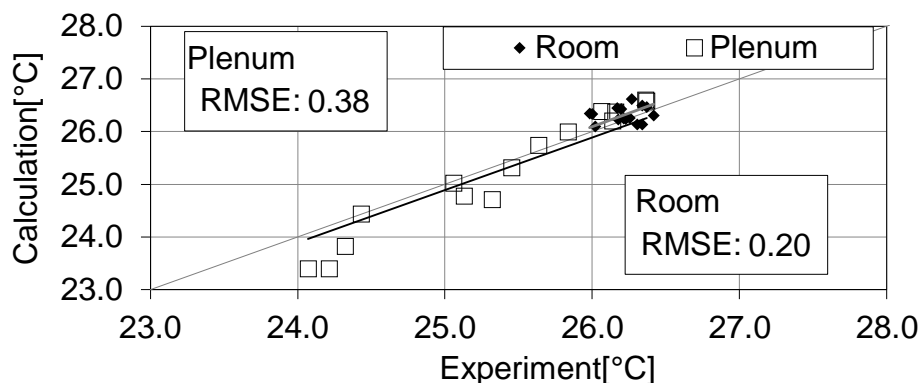


Fig. 4.5.9 居室・天井裏の空気温度及びパネルの表面温度の計算値と実験値

4.5.7 表面温度

Fig. 4.5.10 に天井放射パネルの居室側・天井裏側の表面温度の計算値と実験値の比較を示す。空気温度と同様に実験値の傾向を概ね再現できており、高い精度でパネル表面温度を計算できている。

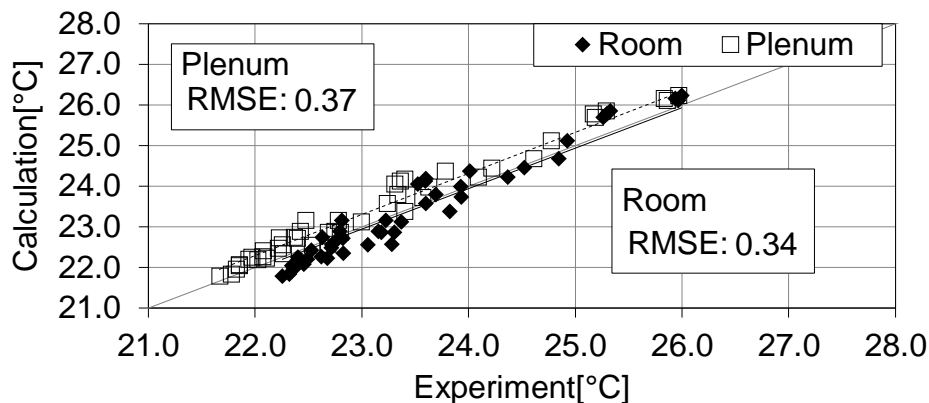


Fig. 4.5.10 天井放射パネルの居室側・天井裏側の表面温度の計算値と実験値

4.5.8 処理熱量

Fig. 4.5.11 に計算と実験による能力線図の比較を示す。若干の誤差は生じているが、天井裏と居室の負荷の比率による天井放射パネルの処理可能な負荷の違いが再現できている。天井放射パネルの空調性能について、天井裏と居室の負荷比率や、天井放射パネルにより冷却された天井裏空気が、居室側の負荷処理に寄与する効果を考慮できることを示した。

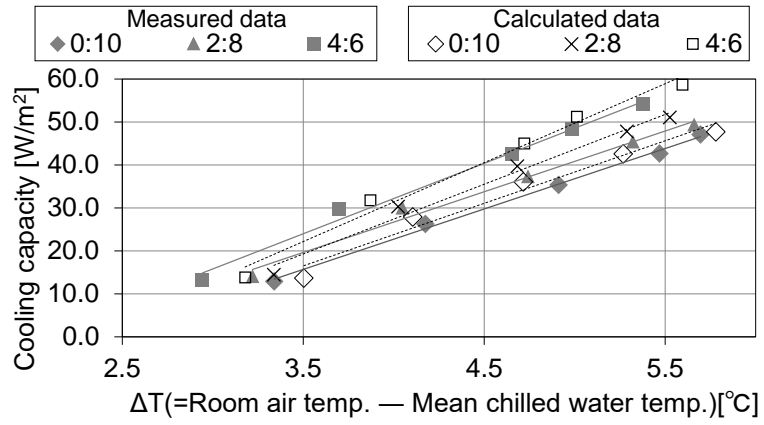


Fig. 4.5.11 計算と実験による能力線図

第4章 天井放射パネル空調熱収支モデル

4.6 実大実験データを用いた伝熱係数の同定

前節では基礎実験のデータを用いた伝熱係数の同定を示し、熱収支モデルによる各熱収支式を連立させて解いた空気温度や表面温度と実験値との比較により、同定結果の妥当性を示した。熱収支モデルにおける伝熱係数によるモデル化が実大空間や形状の異なるパネルにおいても適用可能かどうか検証を行うため、本節では前節で扱った異なるパネルを対象として、前節と同様の方法で伝熱係数の同定を行った。

4.6.1 パネル熱貫流率同定方法

本節で示すパネル熱貫流率の同定には、2.3節で示した「スリットパネル」を対象とする。

4.6.1.1 配管-パネル間の空隙熱抵抗の同定

① 空隙熱抵抗とパネル熱貫流率の関係式の導出

4.5.3項と同様の方法で熱貫流率の同定を行う。前節で示した天井放射パネルは配管、ヒートシンク、パネルという構成であるが、本検討での天井放射パネルは、配管とパネルが直接固定される形状で、部材数が少ない。そのため、熱抵抗が小さくなるため、 K_r の各係数(a_r , b_r)は前節での値よりも小さな数値となる。 K_p の各係数(a_p , b_p , c_p)は前節の値よりも若干大きな値となったのは、配管の設置幅が前節で対象としたパネルでは100 mmに対して、本検討での天井放射パネルでは115 mmとなっており、配管の長さに対するパネルの面積が大きくなったことが影響している。

$$K_r = 1/(a_r R + b_r) \dots\dots\dots (4-56)$$

ここで $a_r = 72.423$, $b_r = 0.310$

$$K_p = 1/(a_p R + b_p) + 1/c_p \dots\dots\dots (4-57)$$

ここで $a_p = 60.326$, $b_p = 0.251$, $c_p = 0.217$

$$K_{rps} = 15792 \dots\dots\dots (4-58)$$

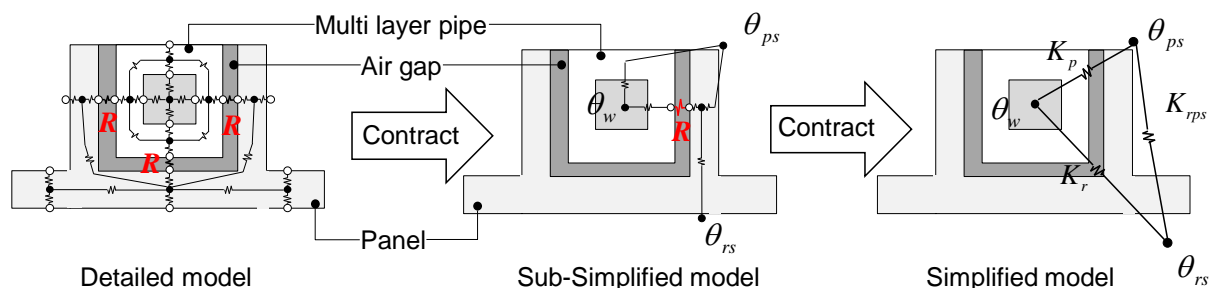


Fig. 4.6.1 パネル熱貫流率同定方法①

②実験結果を用いた空隙熱抵抗の同定

上記で得た空隙熱抵抗とパネル熱貫流率の関係式((4-56)式と(4-57)式)を(41)式に代入し、実験結果で得られる(4-41)の左辺と右辺が合致するように、 R を同定した((4-59)式)。

$$\frac{q_{pw}}{L_p} = K_r (\theta_{rs} - \theta_{w,ave}) + K_p (\theta_{ps} - \theta_{w,ave}) \dots\dots\dots (4-41)再$$

$$R=0.055 \dots\dots\dots (4-59)$$

基礎実験で扱った天井放射パネルよりも空隙の熱抵抗値が大きくなる結果となった。基礎実験で扱った天井放射パネルは、パネルに配管とヒートシンクが“載る”形状となっているのに対し、配管にパネルが“ぶら下がる”ような形状となっているため、配管とパネルの空隙が大きくなり、熱抵抗値が大きくなったと考えられる。

Fig. 4.6.2 は同定された R を用いて、(4-41)式の関係性をプロットしたものである。基礎実験でのデータと比べて、ばらつきが大きい。検証の対象とした天井放射パネルは試作品であったため、パネルごとの製作誤差などが影響してこのようなばらつきが生じたと考えられる。

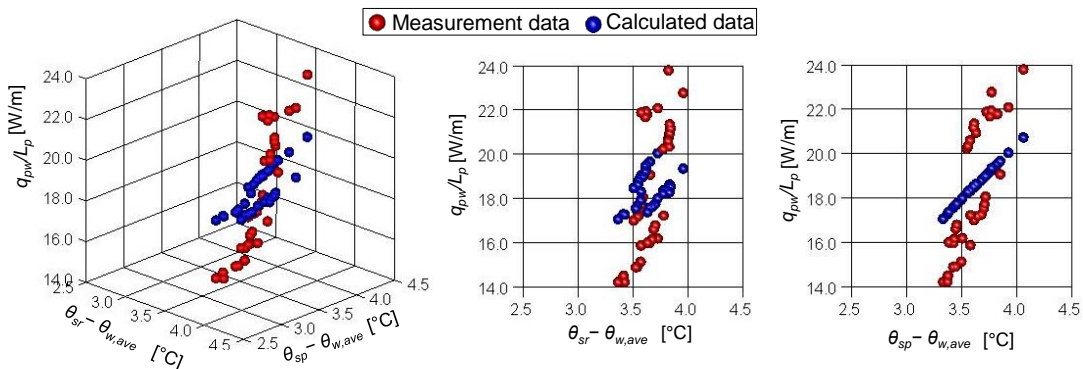


Fig. 4.6.2 パネル配管間空隙熱抵抗の同定結果

4.6.1.2 低流量域での配管-冷水間熱伝達率の同定

① 配管-冷水間熱伝達率とパネル熱貫流率の関係式の導出

配管-冷水間熱伝達率とパネル貫流率の関係式の、 K_r の各係数 (d_r , e_r) は前節での値よりも小さな数値となる。 K_p の各係数 (d_p , e_p) は前節の値よりも若干大きな値となっており、前項での 4.5 節で対象とした天井放射パネルとの違いと同様の傾向が表れている。

$$K_r = 1 / (d_r / \alpha + e_r) \dots\dots\dots (60)$$

ここで $d_r = 104.101$, $e_r = 4.240$

$$K_p = 1 / (d_p / \alpha + e_p) \dots\dots\dots (61)$$

ここで $d_p = 54.731$, $e_p = 0.279$

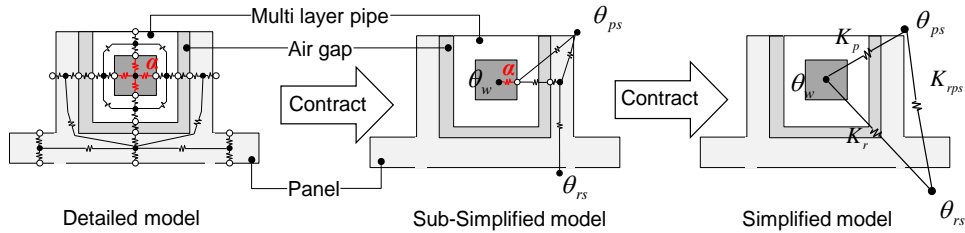


Fig. 4.6.3 パネル熱貫流率同定方法②

② 実験結果を用いた冷水－配管熱伝達率の同定

前節と同様の方法で同定した結果を Fig. 4.6.4 に示す。本検討での天井放射パネルと前節で示した天井放射パネルでの冷水－配管熱伝達率の同定結果を併記している。両者は同等の値が得られており、レイノルズ数が小さい低流量域においては、層流と乱流の中間の値をとっている。以上の2点からも、パラメータ同定の方法が妥当であると考えられる。

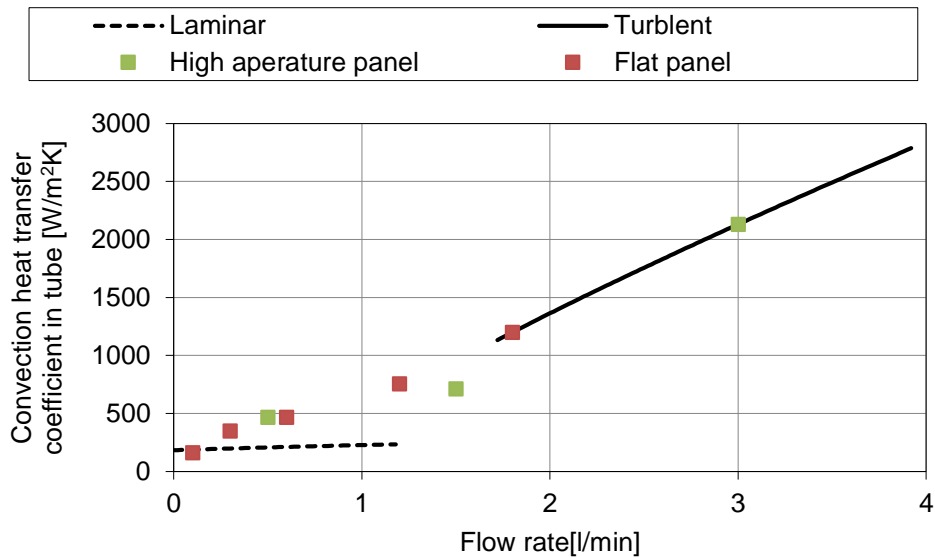


Fig. 4.6.4 配管-冷水間熱伝達率同定結果

4.6.1.3 パネル熱貫流率同定結果

Fig. 4.6.5 に前節で得られた熱抵抗値，配管－冷水間熱伝達率を用いて計算した本検討で用いた天井放射パネルと比較対象として前節で示した天井放射パネルのパネル熱貫流率を示す。 K_r （居室側パネル熱貫流率）に関しては材料構成を簡略化が寄与し、従来パネルよりも4倍以上大きい。一方で K_p （天井裏側パネル熱貫流率）は同程度となっている。

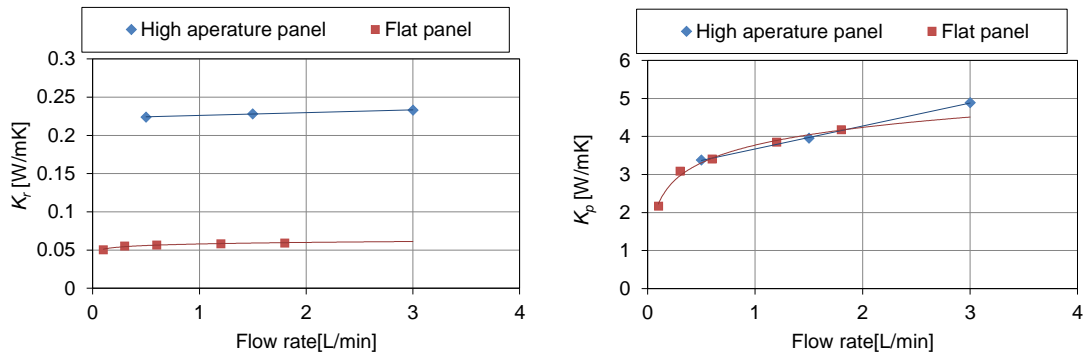


Fig. 4.6.5 パネル熱貫流率同定結果（左： K_r ，右： K_p ）

4.6.2 伝熱係数の同定結果の検証

Fig. 4.6.6 に 2.2 節で得られた熱伝達率（Table 4.6.1 参照）と前項で得られたパネル熱貫流率を用い，4.5.5.2 項に示した方法で得られた能力線図と実験結果の比較を示す。実験で得られた処理熱量が本予測手法による能力線図上にプロットされており，形状の異なる放射パネルについても熱収支モデルの伝熱係数の同定方法が適用できることを示した。また，各種の敷設条件における居室側パネルの総合熱伝達率を用いることで，敷設条件による処理能力の違いを再現することができることを示した。

Table 4.6.1 居室側パネルの総合熱伝達率（対流+放射）

天井条件	試験室	負荷位置	
		照明ライン	パネル直下
ガラス繊維シート (CA)	試験室①	11.1 (6.0+5.1)	12.5 (7.3+5.2)
スケルトン(SK)		13.0 (7.8+5.2)	13.2 (7.9+5.3)
岩綿吸音板(GB)	試験室②	11.9 (6.0+5.9)	11.7 (6.7+5.0)
岩綿吸音板(GB)+スリット無		8.9 (4.1+4.8)	8.8 (3.9+4.9)
スケルトン(SK)		12.6 (7.6+5.0)	12.6 (7.6+5.0)

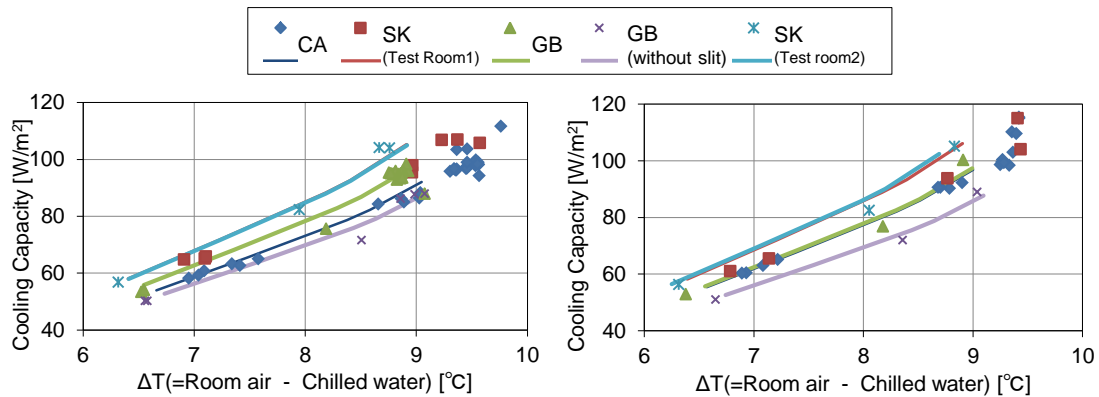


Fig. 4.6.6 計算と実験による能力線図
（負荷位置 左：照明ライン，右：パネル直下）

第4章 天井放射パネル空調熱収支モデル

4.7 まとめ

本章では、天井放射パネル空調熱収支モデルを提案し、本モデル化方法の妥当性を検証する実験を示し、下記の知見を得た。

①天井放射パネル熱収支モデルの提案

天井放射パネル空調の温熱環境や天井放射パネルの冷却能力を予測するためには、(A)居室、(B)天井裏空間、(C)天井放射パネルの居室側表面、(D)天井放射パネル天井裏側表面、(E)天井放射パネル配管内冷水の5種類の熱収支を解く必要があることを示した。

②天井放射パネル空調の熱収支構造の解明

天井放射パネル放熱特性検証実験を行い、天井裏と居室の負荷比率により天井放射パネルが処理可能な負荷が変化すること、天井放射パネルにより冷却された天井裏の空気が居室側の負荷処理に寄与することを示した。これにより、天井放射パネル表面での熱収支だけではなく、天井放射パネルを覆う空間全体での熱収支を考慮する必要性が示され、熱収支モデルの妥当性を証明した。

③天井放射空調熱収支モデルにおける伝熱係数の同定方法の提示と精度検証

実験値を用いた天井放射空調熱収支モデルにおける伝熱係数の同定方法を示した。同様の実験を行うことで、実験で用いた放射パネル以外でもこの方法が適用可能であり、一般化が可能である。また、基礎実験のみでなく、実大実験のデータを用いて伝熱係数の同定を試み、実験結果を再現できることを示した。

変数定義（第5章、第7章と共通）

q_{ras} :	居室空気－天井放射パネル表面間の対流熱流	[W]
q_{raw} :	居室空気－居室壁面間の対流熱流	[W]
q_{rws} :	居室壁面－天井放射パネル間の放射熱流	[W]
q_{brc} :	居室発熱体－空気間の対流熱流	[W]
q_{brrs} :	居室発熱体－天井放射パネル間の放射熱流	[W]
q_{brrw} :	居室発熱体－壁面間の放射熱流	[W]
q_{pas} :	天井裏空気－天井放射パネル間の対流熱流	[W]
q_{paw} :	天井裏空気－壁面間の対流熱流	[W]
q_{pws} :	天井裏壁面－天井放射パネル間の放射熱流	[W]
q_{bpc} :	天井裏発熱体－空気間の対流熱流	[W]
q_{bprs} :	天井裏発熱体－天井放射パネル間の放射熱流	[W]
q_{bprw} :	天井裏発熱体－壁面間の放射熱流	[W]
q_{tra} :	居室空気－天井裏空気間の伝導熱流	[W]
q_{ad} :	居室空気－天井裏空気間の移流熱流	[W]
q_{br} :	居室発熱体発熱量	[W]
q_{bp} :	天井裏発熱体発熱量	[W]
q_{rwi} :	居室壁体の外部からの伝導熱流	[W]
q_{pwi} :	天井裏壁体の外部からの伝導熱流	[W]
q_{rps} :	天井放射パネルの居室－天井裏側表面間の伝導熱流	[W]
q_{rsw} :	天井放射パネルの居室側表面－配管内冷水間の伝導熱流	[W]
q_{psw} :	天井放射パネルの天井裏側表面－配管内冷水間の伝導熱流	[W]

q_{pw} :	天井放射パネルの冷水による除去熱量	[W]
θ_{ra} :	居室空気温度	[°C]
θ_{pa} :	天井裏空気温度	[°C]
θ_{re} :	天井放射パネルの居室側環境温度	[°C]
θ_{pe} :	天井放射パネルの天井裏側環境温度	[°C]
θ_{rs} :	天井放射パネルの居室側表面温度	[°C]
θ_{ps} :	天井放射パネルの天井裏側表面温度	[°C]
$\theta_{rs,k}$:	k 枚目の天井放射パネルの居室側表面温度	[°C]
$\theta_{ps,k}$:	k 枚目の天井放射パネルの天井裏側表面温度	[°C]
θ_{br} :	居室発熱体の表面温度	[°C]
θ_{bp} :	天井裏発熱体の表面温度	[°C]
$\theta_{w,k}$:	k 枚目の天井放射パネルの冷水出口温度	[°C]
θ_w :	天井放射パネルの配管内の冷水温度	[°C]
$\theta_{w,ave,k}$:	k 枚目の天井放射パネルの平均冷水温度	[°C]
$\theta_{w,0}$:	1 枚目の天井放射パネルの入口温度	[°C]
n :	天井放射パネルの連結枚数	[-]
Q_w :	天井放射パネルへの送水流量	[m ³ /s]
S_p :	1 枚当たりの天井放射パネルの有効面積	[m ²]
S_c :	天井放射パネル以外の天井の面積	[m ²]
L_p :	1 枚当たりの天井放射パネルの有効配管長さ	[m]
V_{wp} :	天井放射パネルの配管内の保有冷水容積	[m ³]
V_{ra} :	居室空気容積	[m ³]
V_{pa} :	天井裏空気容積	[m ³]
V_{rp} :	天井放射パネル居室側容積	[m ³]
V_{pp} :	天井放射パネル天井裏側容積	[m ³]
V_{rw} :	居室壁体容積	[m ³]
V_{pw} :	天井裏壁体容積	[m ³]
V_{br} :	居室発熱体容積	[m ³]
V_{bp} :	天井裏発熱体容積	[m ³]
ρ_a :	空気密度	[kg/m ³]
ρ_w :	冷水密度	[kg/m ³]
ρ_{rp} :	天井放射パネル居室側密度	[kg/m ³]
ρ_{pp} :	天井放射パネル天井裏側密度	[kg/m ³]
ρ_{rw} :	居室壁体密度	[kg/m ³]
ρ_{pw} :	天井裏壁体密度	[kg/m ³]
ρ_{br} :	居室発熱体密度	[kg/m ³]
ρ_{bp} :	天井裏発熱体密度	[kg/m ³]
c_a :	空気比熱	[J/kg·K]
c_w :	冷水比熱	[J/kg·K]
c_{rp} :	天井放射パネル居室側比熱	[J/kg·K]
c_{pp} :	天井放射パネル天井裏側比熱	[J/kg·K]
c_{rw} :	居室壁体比熱	[J/kg·K]

第4章 天井放射パネル空調熱収支モデル

c_{pw} :	天井裏壁体比熱	[J/kg·K]
c_{br} :	居室発熱体比熱	[J/kg·K]
c_{bp} :	天井裏発熱体比熱	[J/kg·K]
α_r :	天井放射パネル居室側表面総合熱伝達率	[W/m ² ·K]
α_p :	天井放射パネル天井裏側表面総合熱伝達率	[W/m ² ·K]
Q_a :	居室空気－天井裏空気間の移流量	[m ³ /s]
K_c :	天井放射パネル以外の天井の熱貫流率	[W/m ² ·K]
K_r :	居室側パネル熱貫流率	[W/m·K]
K_p :	天井裏側パネル熱貫流率	[W/m·K]
K_{rps} :	居室－天井裏表面間パネル熱貫流率	[W/m ² ·K]
C_r :	実験装置・居室チャンバー内 CO ₂ 濃度	[ppm]
C_p :	実験装置・天井裏チャンバー内 CO ₂ 濃度	[ppm]
V_r :	実験装置・居室チャンバー容積	[m ³]
V_p :	実験装置・天井裏チャンバー容積	[m ³]
$\alpha_{r,c}$:	天井放射パネル居室側表面对流熱伝達率	[W/m ² ·K]
$\alpha_{p,c}$:	天井放射パネル天井裏側表面对流熱伝達率	[W/m ² ·K]
α_{ad} :	移流熱伝達係数	[W/K]
R :	配管－ヒートシンク間の空隙抵抗	[m·K/W]
α :	配管－冷水間熱伝達率	[W/m ² ·K]

参考文献

- 1) EN 14240: Ventilation for buildings – Chilled ceilings – Testing and rating, European Committee for Standardization, 2004.
- 2) 放射（輻射）冷暖房協会: ARCH 2017 CHTRS Ver. 1.1 天井放射冷暖房パネル性能試験規格書, 2018.5
- 3) 水出喜太郎, 本郷太郎, 一ノ瀬雅之, 福留伸高, 厨まり子, 矢島大督, 加藤直樹, 山田一樹: 微気流を併用した放射空調を行うオフィスの温熱環境に関する実験研究 その1 システム概要ならびに模擬空間での冷房実験における室内温熱環境, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学Ⅱ, pp.1375-1376, 2014.9
- 4) 一ノ瀬雅之, 三浦貴広, 山田一樹, 水出喜太郎, 本郷太郎, 厨まり子, 福留伸高: 微気流を併用した放射空調を行うオフィスの温熱環境に関する実験研究 その2 放射パネルの熱的特性と室内温熱環境, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学Ⅱ, pp.1377-1378, 2014.9
- 5) 水出喜太郎, 本郷太郎, 一ノ瀬雅之, 木下碧子, 倉田佐帆, 矢島大督, 山田一樹: 放射空調を行う都市型環境建築の性能検証 (その1) 竣工時・運用段階での性能検証概要ならびに微気流併用と温度緩和効果の検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学Ⅱ, pp.1355-1356, 2016.8
- 6) 木下碧子, 一ノ瀬雅之, 山田一樹, 水出喜太郎, 本郷太郎, 矢島大督: 放射空調を行う都市型環境建築の性能検証 その6 パネル単体性能測定手法の提案と熱収支の調査, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学Ⅱ, pp.991-992, 2017.8

- 7) 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 624 号, pp.221-227, 2008. 2
- 8) ISO 18566-3: Building environment design. Design, test methods and control of hydronic radiant heating and cooling panel systems. Part 3: Design of ceiling mounted radiant panels. International Organization for Standardization, Geneva, 2017
- 9) 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, No. 683, pp.31-37, 2013.1
- 10) 日本機械学会編: 伝熱工学科資料 改訂第 5 版, 丸善出版, 2013. 3.
- 11) SHASE-S116: トレーサガスを用いた単室の換気量測定法, 空気調和・衛生工学会, 2011
- 12) G. B. Wilkes, C. M. F. Peterson.: Radiation and convection from surfaces in various positions, Transactions American Society of Heating and Ventilating Engineers, Vol. 44, pp.513-522, 1939.
- 13) <http://www.wacopon.com/large-container/panel.php> (in Japanese) (accessed 2018. 1. 30)
- 14) 田中俊六, 武田仁, 岩田利枝, 土屋喬雄, 寺尾道仁: 最新建築環境工学, p.195, 井上書店, 2006
- 15) 空気調和・衛生工学会編: 空気調和・衛生工学便覧 第 13 版 1 基礎篇, 丸善, 2001

第5章 天井放射パネル空調性能予測手法

第5章 天井放射パネル空調性能予測手法

5.1 既往研究の課題と本章の位置づけ

天井放射パネルの空調性能を表示する能力線図として、EN14240 や ARCH 2017 CHTRS で規定される横軸に室温と冷水温度の平均値の差として、縦軸にパネル処理熱量をプロットしたものが^{1), 2)}ある。室内の空気温度や送水温度を決定し、その条件での処理熱量を参照することができる点で優れたものである。また、同一の条件で天井放射パネルの能力を比較することができる。Fig. 5.1.1 に放射パネルの冷却能力の参照方法の例を示す。例えば、設計と条件を室温を 26.0 °C、冷水入口温度を 16.0 °C、冷水温度差を 2.0 °C と設定すると、横軸の値 $\Delta T=9.0^{\circ}\text{C}$ を得る。この能力線図を例においては、給気がある場合とない場合での冷却能力を比較し、冷却能力を得ることができる。ただし、想定する条件でのパネル表面温度や流量などは参照することができず、設計に必要な情報を示すのには不十分であると考えられる。

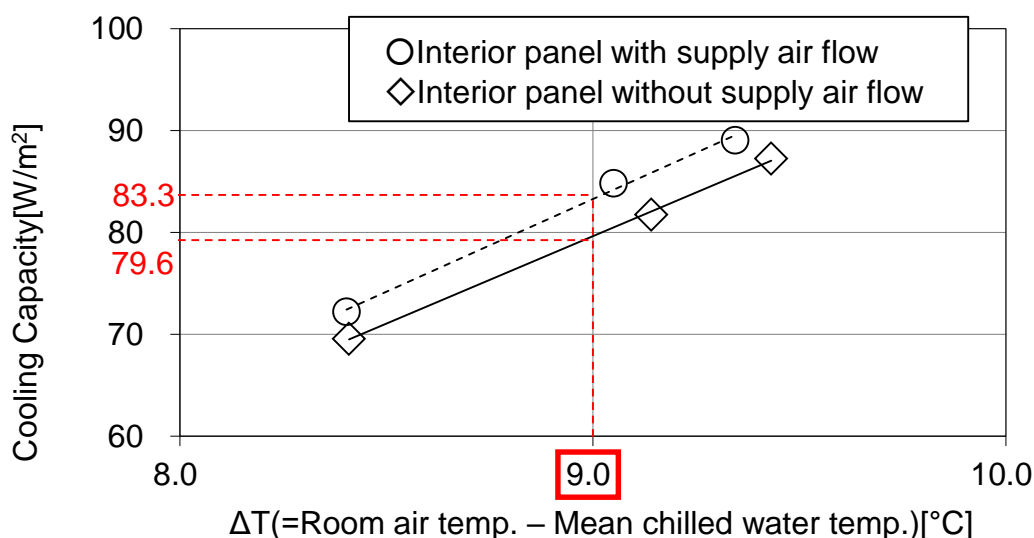


Fig. 5.1.1 既存能力線図の冷却能力参照方法

4章において天井放射パネル空調熱収支モデルについて示し、天井放射パネルの負荷処理のメカニズムについて詳細に検証するための実験を行い、熱収支モデルの妥当性の検証を行った。さらに実験結果から熱収支モデルに用いるパネル表面の熱伝達率、天井裏と居室空気の移流による熱移動を表すための熱伝達係数、パネル熱貫流率を同定する方法を示した。実験での発熱量と冷水送水温度と流量を入力として、伝熱パラメータを用いた各熱収支式を連立させ、パネル表面温度と空気温度の実験結果を再現することが可能であることを示した。ここから、ある入力条件を設定することで、天井放射パネルの設計に必要な情報を導出することができることが示唆された。そこで、上記の EN14240 の規定する能力線図の課題を鑑み、天井放射パネル空調熱収支モデルを応用することで、天井放射パネルの空調の性能を予測することが可能な計算手法（本論文において「天井放射パネル空調性能予測手法」と称する）について示す。これにより任意の条件から様々な天井放射パネル空調に関わる設備仕様を決定することができる。

天井放射パネル空調の設備仕様を決定する際に、熱収支式内の各変数は室内

環境（居室空気温度やパネル表面温度）や設備仕様（パネル面積，パネル連結枚数，流量，送水温度など）があり，ある条件で固定して，熱収支モデルにおける各熱収支式を各変数について連立させて解くことで，設計時に有用な情報を提供することができる。

そこで本章では，まず，熱収支モデルにおける各変数，各定数の設計段階での位置づけを明確化し，連立方程式の解法を示す。さらに設計仕様を決定する際に有用な情報を提示することが可能な能力線図を導出し，能力線図の活用方法について示す。天井放射パネル空調性能予測手法の活用方法を示すことで，本手法の有用性を示す。

第5章 天井放射パネル空調性能予測手法

5.2 天井放射パネル空調性能予測手法の導出

5.2.1 熱収支式における各パラメータの位置づけの整理

Fig. 4.2.2 のように、定常時であることと放射パネルが n 枚連結されると想定し、熱収支モデルにおける熱収支式は、(5-1)～(5-5)式のように表される。

$$0 = q_{br} + q_{rwt} - K_c S_c (\theta_{ra} - \theta_{pa}) - \alpha_{ad} (\theta_{ra} - \theta_{pa}) - \alpha_r S_p \sum_{k=1}^n (\theta_{ra} - \theta_{rs,k}) \dots\dots\dots (5-1)$$

$$0 = q_{bp} + q_{pwt} + K_c S_c (\theta_{ra} - \theta_{pa}) + \alpha_{ad} (\theta_{ra} - \theta_{pa}) - \alpha_p S_p \sum_{k=1}^n (\theta_{pa} - \theta_{ps,k}) \dots\dots\dots (5-2)$$

$$0 = \alpha_r S_p (\theta_{ra} - \theta_{rs,k}) - K_{rps} S_p (\theta_{rs,k} - \theta_{ps,k}) - K_r L_p \{ \theta_{rs,k} - 0.5(\theta_{w,k} + \theta_{w,k-1}) \} \dots\dots\dots (5-3)$$

$$0 = \alpha_p S_p (\theta_{pa} - \theta_{ps,k}) + K_{rps} S_p (\theta_{rs,k} - \theta_{ps,k}) - K_p L_p \{ \theta_{ps,k} - 0.5(\theta_{w,k} + \theta_{w,k-1}) \} \dots\dots\dots (5-4)$$

$$0 = K_r L_p \{ \theta_{rs,k} - 0.5(\theta_{w,k} + \theta_{w,k-1}) \} + K_p L_p \{ \theta_{ps,k} - 0.5(\theta_{w,k} + \theta_{w,k-1}) \} - \rho_w c_w Q_w (\theta_{w,k} - \theta_{w,k-1}) \dots\dots\dots (5-5)$$

熱収支式内の各変数や定数は、Table 5.2.1 に示すように、(1) 負荷、(2) 室内温熱環境、(3) パネル内冷水温度、(4) パネル設置条件、(5) パネル種類や形状の条件、(6) 設備仕様に分類される。それぞれの項目で固定条件、すなわち入力条件として扱うもの (Input: 表中の “I”) とある条件に関して確認する条件、すなわち出力条件として扱うもの (Output: 表中の “O”) で分類している。また天井放射パネル空調性能予測手法の活用用途によって、Input と Output ともなる項目については “I/O” と表記している。

「(1) 負荷」に関しては、ある建築条件に対して、負荷計算により算出される値とする場合は、入力条件となる。また、冷水温度や流量、室内環境条件などの設備仕様が決められている場合は、その条件でのパネルの冷却能力として、未知数として扱う場合もある。

「(2) 室内温熱環境条件」の居室空気温度や居室側パネル表面温度に関しては、設計と条件として扱われる。天井裏空気温度や天井裏側パネル表面温度は、設計上は特に必要のない情報であり、2次的に算出される数値である。

「(3) パネル内冷水温度」に関しては、冷水入口温度については、室内環境条件や負荷条件が決められている場合、その条件を成立させるための冷水入口温度を確認するように未知数として扱う場合がある。また、冷水入口温度を設備仕様として扱い、その際の冷却能力を確認するように、入力条件として扱う場合がある。各パネルの出口温度はパネルの系統ごとの温度差を規定する場合などに固定条件として扱う場合がある。

「(4) パネル種類や形状の条件」の、パネル熱貫流率はパネルを構成する材料の熱伝導率等に依存し、採用するパネルにより決定される。パネル有効配管長は天井放射パネルにおいて、パネルの冷却に有効に寄与する配管の長さである。パネルの形状を決定するために重要なパネルの仕様である。パネル居室側

第5章 天井放射パネル空調性能予測手法

総合熱伝達率やパネル天井裏側総合熱伝達率は、パネル表面の仕上げ・形状（対流熱伝達を促進するようなルーバー形状など）に依存する。また、大2章の実験結果にて示したように負荷の位置や天井の開口率にも依存するため、「(5) パネル設置条件」にも分類することが可能である。

「(5) パネル設置条件」は、天井放射パネルを含む天井の条件である。パネルにより冷却された天井裏空気の居室の負荷の処理に対する寄与を考慮するために、重要な入力条件となる。「天井裏と居室の空気にかかわるコンダクタンス」に関しては、天井の開口率に依存する。また、給・排気条件に依存する定数でもあり、「(6) 設備仕様」にも分類することが可能である。

「(6) 設備仕様」に関しては、冷水流量があげられる。なお、パネル熱貫流率は冷水流量に依存する物理量であるため、重要な入力条件である。

Table 5.2.1 熱収支式の変数・定数の分類

No.	分類	項目	変数名	単位	数	Input or Output
1	(1) 負荷	居室負荷	$q_{br}+q_{rwt}$	W	1	I/O
2		天井裏負荷	$q_{br}+q_{rwt}$	W	1	I/O
3	(2) 室内 温熱 環境	居室空気温度	θ_{ra}	°C	1	I/O
4		天井裏空気温度	θ_{pa}	°C	1	O
5		居室側パネル表面温度	$\theta_{rs,1}\sim\theta_{rs,n}$	°C	n	I/O
6		天井裏側パネル表面温度	$\theta_{ps,1}\sim\theta_{ps,n}$	°C	n	O
7	(3) パネル 冷水温度	冷水入口温度	$\theta_{w,0}$	°C	1	I/O
8		各パネル出口温度	$\theta_{w,1}\sim\theta_{w,n}$	°C	n	I/O
9	(4) パネル 種類・ 形状	冷水－居室側パネル熱貫流率	K_r	W/mK	-	I
10		冷水－天井裏側パネル熱貫流率	K_p	W/mK	-	I
11		居室－天井裏パネル熱貫流率	K_{rps}	W/m ² K	-	I
12		パネル有効配管長	L_p	m	-	I
13		パネル居室側総合熱伝達率	α_r	W/m ² K	-	I
14		パネル天井裏側総合熱伝達率	α_p	W/m ² K	-	I
15	(5) パネル 設置条件	パネル設置面積	S_p	m ²	-	I
13'		パネル居室側総合熱伝達率	α_r	W/m ² K	-	I
14'		パネル天井裏側総合熱伝達率	α_p	W/m ² K	-	I
16		パネル以外の天井材熱貫流率	K_c	W/m ² K	-	I
17		パネル以外の天井材の面積	S_c	m ²	-	I
18		天井裏と居室の空気の循環にか かわるコンダクタンス	α_{ad}	W/K	-	I
19	(6) 設備 仕様	冷水流量	Q_w	m ³ /s	-	I
7'		冷水入口温度	$\theta_{w,0}$	°C	1	I/O
18'		天井裏と居室の空気の循環にか かわるコンダクタンス	α_{ad}	W/K	-	I

5.2.2 連立方程式の解法

行列表記で各熱収支式を表すと(5-6)式のようになる。

$$\begin{pmatrix}
 -1 & 0 & A & B & C & \dots & C & \dots & C & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\
 0 & -1 & B & A' & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & D & \dots & D & \dots & D & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\
 \vdots & 0 & C & 0 & E & 0 & \dots & \dots & 0 & F & 0 & \dots & \dots & 0 & G & G & 0 & \dots & 0 \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & & & & \ddots & \ddots & & & \ddots & \ddots & & & & \vdots \\
 \vdots & \vdots & C & \vdots & & \ddots & E & \ddots & & \ddots & F & \ddots & & \ddots & G & G & \ddots & & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \ddots & \ddots & \ddots & & \ddots & \ddots & \ddots & & \ddots & \ddots & \ddots & & & 0 \\
 \vdots & \vdots & C & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & E & \ddots & & \ddots & F & 0 & \dots & \dots & 0 & G & G \\
 \vdots & \vdots & 0 & D & F & 0 & \dots & \dots & 0 & H & \ddots & & \ddots & I & I & 0 & \dots & \dots & 0 \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 & \ddots & & & & \ddots & \ddots & & \ddots & \ddots & & & & & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & D & \vdots & \ddots & F & \ddots & & \ddots & H & \ddots & & \ddots & I & I & & & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & & \ddots & \ddots & \ddots & & \ddots & \ddots & \ddots & & & 0 \\
 \vdots & \vdots & 0 & D & 0 & & & \ddots & F & \ddots & & \ddots & H & 0 & \dots & \dots & 0 & I & I \\
 \vdots & \vdots & 0 & 0 & J & \ddots & & & \ddots & K & \ddots & & \ddots & M & L & 0 & \dots & \dots & 0 \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & & & & \ddots & \ddots & & \ddots & \ddots & \ddots & & & & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & J & \ddots & & \ddots & K & \ddots & & \ddots & M & L & \ddots & & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & & \ddots & \ddots & \ddots & & \ddots & \ddots & \ddots & & & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & J & 0 & \dots & \dots & 0 & K & 0 & \dots & \dots & 0 & M & L
 \end{pmatrix}
 \begin{pmatrix}
 q_r \\
 q_p \\
 \theta_{ra} \\
 \theta_{pa} \\
 \theta_{rs,1} \\
 \vdots \\
 \theta_{rs,k} \\
 \vdots \\
 \theta_{rs,n} \\
 \theta_{ps,1} \\
 \vdots \\
 \theta_{ps,k} \\
 \vdots \\
 \theta_{ps,n} \\
 \theta_{w,0} \\
 \theta_{w,1} \\
 \vdots \\
 \theta_{w,k} \\
 \vdots \\
 \theta_{w,n}
 \end{pmatrix}
 = \mathbf{0}$$

$$A = K_c S_c + \alpha_{ad} + \alpha_r n S_p \dots\dots\dots (5-7)$$

$$A' = K_c S_c - \alpha_{ad} - \alpha_p n S_p \dots\dots\dots (5-8)$$

$$B = -K_c S_c - \alpha_{ad} \dots\dots\dots (5-9)$$

$$C = -\alpha_r S_p \dots\dots\dots (5-10)$$

$$D = -\alpha_p S_p \dots\dots\dots (5-11)$$

$$E = \alpha_r S_p + K_{rps} S_p + K_r L_p \dots\dots\dots (5-12)$$

$$F = -K_{rps} S_p \dots\dots\dots (5-13)$$

$$G = -0.5 K_r L_p \dots\dots\dots (5-14)$$

$$H = \alpha_p S_p + K_{rps} S_p + K_p L_p \dots\dots\dots (5-15)$$

$$I = -0.5 K_p L_p \dots\dots\dots (5-16)$$

$$J = -K_r L_p \dots\dots\dots (5-17)$$

$$K = -K_p L_p \dots\dots\dots (5-18)$$

$$L = \rho_w c_w Q_w + 0.5(K_r L_p + K_p L_p) \dots\dots\dots (5-19)$$

$$M = -\{\rho_w c_w Q_w - 0.5(K_r L_p + K_p L_p)\} \dots\dots\dots (5-20)$$

(5-6)式は、 $3n+2 \times 3n+5$ の行列と $3n+5$ 行の変数ベクトルにより構成される。 $3n+2 \times 3n+5$ の行列の各項は、Table 5.3.1 に示す Input / Output の分類での Input のみに分類されるパラメータ（「(4) パネル種類・形状」，「(5) パネル設置条件」，「(6) 設備条件」）から得られる。この行列を，パネル種類・形状，パネル設置条件，設備条件ごとに求めることで，種々の条件における天井放射パネルの空調性能の予測が可能となる。本論文ではこの行列を「天井放射パネル特性行列」と称する。ここで，天井放射パネル特性行列は正方行列となっておらず，連立方程式を解くことができない。これを解決するためには，変数を固定条件として与える，または，新たな条件式を方程式に導入する必要がある。解決方法としては以下の 4 つの方法が考えられる。

- (1) $3n+5$ 個の変数のうち 3 つを固定条件として与える方法
 - (2) $3n+5$ 個の変数のうち 2 つを固定条件として，新たに 1 つの方程式を導入する方法
 - (3) $3n+5$ 個の変数のうち 1 つを固定条件として，新たに 2 つの方程式を導入する方法
 - (4) 新たに 3 つの方程式を導入する方法
- それぞれ(1)~(4)の方法の例と用途の対応を Table 5.3.2 に示す。

Table. 5.3.2 行列式を解く方法の例と用途の対応

No.		用途	Input	Optional Equation	Output
(1)	-1	負荷と室温から冷水入口温度と表面温度分布を求める	$q_{br}, q_{bp}, \theta_{ra}$	-	$\theta_{w,0}, \theta_{rs,1} \sim \theta_{rs,n}$
	-2	負荷と冷水入口温度から室内環境条件を求める	$q_{br}, q_{bp}, \theta_{w,0}$	-	$\theta_{ra}, \theta_{rs,1} \sim \theta_{rs,n}$
(2)	-1	負荷とパネル表面温度平均値から冷水入口温度を求める	$q_{br}, q_{bp}, (\theta_{rs})$	(5-21)式	$\theta_{w,0}, \theta_{ra}$
	-2	負荷と室内環境条件(作用温度)から冷水入口温度を求める	$q_{br}, q_{bp}, (OT)$	(5-22)式	$\theta_{w,0}$
(3)	-1	冷水温度と室内環境条件からパネルの処理熱量を求める	$\theta_{w,0}, (OT), (\beta)$	(5-22)式 (5-23)式	q_{br}, q_{bp}
(4)	-1	冷水往還温度差と室内環境条件から冷水入口温度を求める	$(OT), (\beta), (\Delta\theta_w)$	(5-22)式 (5-23)式 (5-24)式	$q_{br}, q_{bp}, \theta_{w,0}$
	-2	パネル表面温度分布と室内環境条件からパネル処理熱量と冷水温度を求める	$(OT), (\beta), (\Delta\theta_{rs})$	(5-22)式 (5-23)式 (5-25)式	$q_{br}, q_{bp}, \theta_{w,0}$

$$\theta_{rs} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \theta_{rs,k} \dots\dots\dots (5-21)$$

$$OT = \frac{1}{2} \left\{ \theta_{ra} + (1-\phi)\theta_{ra} + \frac{\phi}{n} \sum_{k=1}^n \theta_{rs,k} \right\} \dots\dots\dots (5-22)$$

$$0 = (1-\beta)q_{br} - \beta q_{pr} \dots\dots\dots (5-23)$$

$$\left(\Leftrightarrow \beta = \frac{q_{br}}{q_{br} + q_{pr}} \right)$$

$$\Delta\theta_w = \theta_{w,n} - \theta_{w,0} \dots\dots\dots (5-24)$$

$$\Delta\theta_{rs} = \theta_{rs,n} - \theta_{rs,1} \dots\dots\dots (5-25)$$

以下に Table 5.3.2 に挙げた例での天井放射パネル特性行列の導出方法を示す。

(1)-1 負荷と室温から冷水温度と表面温度分布を求める

負荷と居室空気温度を入力値として、天井放射パネルの表面温度分布を求めるための連立方程式は、(5-6)式の右辺に入力値 (q_r, q_p, θ_{ra}) を移項すると(5-26)式のようになる。(5-26)式の右辺の $3n+2 \times 3n+2$ の正方行列の逆行列を解くことで、右辺の $3n \times 2$ の未知数を解くことができる。従来の EN14240 で規定される能力線図では参照することができなかつた表面温度分布を算出することが可能となる。居室空気温度や負荷が決まっている中で、この条件を満たす天井放射パネルへ送水する冷水入口温度を確認する際に用いることを想定している。

$$\begin{pmatrix}
 B & C & \dots & C & \dots & C & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\
 A' & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & D & \dots & D & \dots & D & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\
 0 & E & 0 & \dots & \dots & 0 & F & 0 & \dots & \dots & 0 & G & G & 0 & \dots & 0 \\
 \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & & \ddots & \ddots & \ddots & & & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & & \vdots \\
 \vdots & & \ddots & E & \ddots & & F & \ddots & & & \ddots & G & G & \ddots & & \vdots \\
 \vdots & & & \ddots & \ddots & & \ddots & \ddots & & & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & & 0 \\
 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & E & \ddots & & \ddots & F & 0 & \dots & \dots & 0 & G & G \\
 D & F & 0 & \dots & \dots & 0 & H & \ddots & & \ddots & I & I & 0 & \dots & \dots & 0 \\
 \vdots & 0 & \ddots & \ddots & & \ddots & \ddots & \ddots & & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & & & \vdots \\
 D & \vdots & \ddots & F & \ddots & & H & \ddots & & \ddots & I & I & \ddots & & & \vdots \\
 \vdots & \vdots & & \ddots & \ddots & & \ddots & \ddots & & & \ddots & \ddots & \ddots & & & 0 \\
 D & 0 & & & \ddots & F & \ddots & & \ddots & H & 0 & \dots & \dots & 0 & I & I \\
 0 & J & \ddots & & \ddots & K & \ddots & & \ddots & M & L & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \\
 \vdots & \ddots & \ddots & & \ddots & \ddots & \ddots & & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & & & & \vdots \\
 \vdots & & \ddots & J & \ddots & K & \ddots & & \ddots & M & L & \ddots & & & & \vdots \\
 \vdots & & & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & & & & 0 \\
 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & J & 0 & \dots & \dots & 0 & K & 0 & \dots & \dots & 0 & M & L
 \end{pmatrix}
 \begin{pmatrix}
 \theta_{pa} \\
 \theta_{rs,1} \\
 \vdots \\
 \theta_{rs,k} \\
 \vdots \\
 \theta_{rs,n} \\
 \theta_{ps,1} \\
 \vdots \\
 \theta_{ps,k} \\
 \vdots \\
 \theta_{ps,n} \\
 \theta_{w,0} \\
 \theta_{w,1} \\
 \vdots \\
 \theta_{w,k} \\
 \vdots \\
 \theta_{w,n}
 \end{pmatrix}
 =
 \begin{pmatrix}
 q_r - (A+B+nC)\theta_{ra} \\
 q_p - B\theta_{ra} \\
 -C\theta_{ra} \\
 \vdots \\
 -C\theta_{ra} \\
 \vdots \\
 -C\theta_{ra} \\
 0 \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 0
 \end{pmatrix}
 \tag{5-26}$$

第5章 天井放射パネル空調性能予測手法

(1)-2 負荷と冷水入口温度から室内環境条件（室温，表面温度分布）を求める

(1)-1 と同様にして，(5-6)式の右辺に入力値 $(q_r, q_p, \theta_{w,0})$ を移項すると(5-27)式を得る。これにより，負荷や冷水温度が決まっている中で，居室空気温度や天井放射パネル表面温度を確認する際に用いることを想定している。

$$\begin{pmatrix}
 A & B & C & C & \dots & C & \dots & C & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\
 B & A' & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & D & D & \dots & D & \dots & D & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\
 C & 0 & E & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & F & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & G & 0 & \dots & \dots & 0 \\
 C & \vdots & \ddots & E & \ddots & & & & \ddots & F & 0 & \dots & \dots & 0 & G & G & \ddots & & \vdots \\
 \vdots & \vdots & & \ddots & \ddots & \ddots & & & \ddots & \ddots & \ddots & & & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\
 C & \vdots & & & \ddots & E & \ddots & & & \ddots & F & \ddots & & & \ddots & G & G & \ddots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & & & & \ddots & \ddots & & & & \ddots & \ddots & & & & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\
 C & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & E & \ddots & & & \ddots & F & 0 & \dots & \dots & 0 & G & G \\
 0 & D & F & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & H & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & I & 0 & \dots & \dots & 0 \\
 \vdots & D & 0 & F & \ddots & & & & \ddots & H & 0 & \dots & \dots & 0 & I & I & \ddots & & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & & & \ddots & \ddots & \ddots & & & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\
 \vdots & D & \vdots & & \ddots & F & \ddots & & & \ddots & H & & & & 0 & I & I & \ddots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & & & \ddots & \ddots & & & & \ddots & \ddots & & & & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\
 \vdots & D & 0 & & & \ddots & F & \ddots & & & \ddots & H & 0 & \dots & \dots & 0 & I & I & \theta_{ps,n} \\
 \vdots & 0 & J & \ddots & & & \ddots & K & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & L & 0 & \dots & \dots & 0 & \theta_{w,1} \\
 \vdots & \vdots & \ddots & J & \ddots & & & \ddots & K & 0 & \dots & \dots & 0 & M & L & \ddots & & & \theta_{w,2} \\
 \vdots & \vdots & & \ddots & \ddots & \ddots & & & \ddots & \ddots & & & & \ddots & \ddots & \ddots & & & \vdots \\
 \vdots & \vdots & & & \ddots & J & \ddots & & & \ddots & K & & & & \ddots & M & L & \ddots & \theta_{w,k} \\
 \vdots & \vdots & & & & \ddots & \ddots & & & & \ddots & \ddots & & & & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\
 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & J & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & K & 0 & \dots & \dots & 0 & M & L \\
 \end{pmatrix}
 \begin{pmatrix}
 \theta_{ra} \\
 \theta_{pa} \\
 \theta_{rs,1} \\
 \theta_{rs,2} \\
 \vdots \\
 \theta_{rs,k} \\
 \vdots \\
 \theta_{rs,n} \\
 \theta_{ps,1} \\
 \theta_{ps,2} \\
 \vdots \\
 \theta_{ps,k} \\
 \vdots \\
 \theta_{ps,n} \\
 \theta_{w,1} \\
 \theta_{w,2} \\
 \vdots \\
 \theta_{w,k} \\
 \vdots \\
 \theta_{w,n}
 \end{pmatrix}
 =
 \begin{pmatrix}
 q_r \\
 q_p \\
 -G\theta_{w,0} \\
 0 \\
 \vdots \\
 0 \\
 \vdots \\
 0 \\
 -I\theta_{w,0} \\
 0 \\
 \vdots \\
 0 \\
 \vdots \\
 0 \\
 -M\theta_{w,0} \\
 0 \\
 \vdots \\
 0 \\
 \vdots \\
 0
 \end{pmatrix}
 \tag{5-27}$$

(2)-1 負荷とパネル表面温度平均値から冷水入口温度を求める

(5-6)式に(5-21)式を組み込み、右辺に入力値 (q_r, q_p, θ_{rs}) を移項すると(5-28)式のようになる。負荷やパネル表面温度平均値を想定した際に、居室空気温度や冷水入口温度を確認する際に用いることを想定している。

$$\begin{pmatrix}
 A & B & C & \dots & C & \dots & C & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\
 B & A' & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & D & \dots & D & \dots & D & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\
 C & 0 & E & 0 & \dots & \dots & 0 & F & 0 & \dots & \dots & 0 & G & G & 0 & \dots & 0 \\
 \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & & & \ddots & \ddots & \ddots & & & \ddots & \ddots & \ddots & & \vdots \\
 C & \vdots & & \ddots & E & \ddots & & \ddots & F & \ddots & & & \ddots & G & G & \ddots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & & & \ddots & \ddots & & & \ddots & \ddots & & & & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\
 C & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & E & \ddots & & \ddots & F & 0 & \dots & \dots & 0 & G & G \\
 0 & D & F & 0 & \dots & \dots & 0 & H & \ddots & & \ddots & I & I & 0 & \dots & \dots & 0 \\
 \vdots & \vdots & 0 & \ddots & \ddots & & & \ddots & \ddots & & & \ddots & \ddots & \ddots & & & \vdots \\
 \vdots & D & \vdots & \ddots & F & \ddots & & \ddots & \ddots & & & \ddots & \ddots & I & I & \ddots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & & \ddots & \ddots & & & \ddots & & & & & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\
 \vdots & D & 0 & & & \ddots & F & \ddots & & \ddots & H & 0 & \dots & \dots & 0 & I & I \\
 \vdots & 0 & J & \ddots & & & \ddots & K & \ddots & & \ddots & M & L & 0 & \dots & \dots & 0 \\
 \vdots & \vdots & 0 & \ddots & & & & \ddots & \ddots & & & \ddots & \ddots & \ddots & & & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & J & \ddots & & \ddots & K & \ddots & & \ddots & M & L & \ddots & & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & & \ddots & \ddots & & & \ddots & & & & \ddots & \ddots & \ddots & & 0 \\
 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & J & 0 & \dots & \dots & 0 & K & 0 & \dots & \dots & 0 & M & L \\
 0 & 0 & N & \dots & N & \dots & N & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0
 \end{pmatrix}
 \begin{pmatrix}
 \theta_{ra} \\
 \theta_{pa} \\
 \theta_{rs,1} \\
 \vdots \\
 \theta_{rs,k} \\
 \vdots \\
 \theta_{rs,n} \\
 \theta_{ps,1} \\
 \vdots \\
 \theta_{ps,k} \\
 \vdots \\
 \theta_{ps,n} \\
 \theta_{w,0} \\
 \theta_{w,1} \\
 \vdots \\
 \theta_{w,k} \\
 \vdots \\
 \theta_{w,n}
 \end{pmatrix}
 =
 \begin{pmatrix}
 q_r \\
 q_p \\
 0 \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \theta_{rs}
 \end{pmatrix}
 \tag{5-28}$$

$$N = 1/n \tag{5-29}$$

第5章 天井放射パネル空調性能予測手法

(2)-2 負荷と室内環境条件(作用温度)から冷水入口温度を求める

(2)-1と同様にして，(5-22)式を(5-6)式に組み込み，入力値 (q_r, q_p, OT) を右辺に移項すると，(5-30)式を得る。天井放射パネル空調において，空気温度のみならず，天井放射パネル表面温度を含めた形で，室内温熱環境の目標を設定する必要がある。ただし，従来の能力線図では，確認することは困難であった。ここで示す行列式を用いることで，負荷と居室内の室内温熱環境条件を想定した際の天井放射パネルへ送水する冷水入口温度を算出することが可能となる。

$$\begin{pmatrix}
 A & B & C & \dots & C & \dots & C & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\
 B & A' & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & D & \dots & D & \dots & D & 0 & \dots & \dots & 0 \\
 C & 0 & E & 0 & \dots & \dots & 0 & F & 0 & \dots & \dots & 0 & G & G & 0 & \dots & \dots & 0 \\
 \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & & & \ddots & \ddots & \ddots & & & \ddots & \ddots & \ddots & & & \vdots \\
 C & \vdots & & \ddots & E & \ddots & & \ddots & F & \ddots & & & \ddots & G & G & \ddots & & \vdots \\
 \vdots & \vdots & & & \ddots & \ddots & & & \ddots & \ddots & & & & \ddots & \ddots & & & 0 \\
 C & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & E & 0 & \dots & \dots & 0 & F & 0 & \dots & \dots & 0 & G & G \\
 0 & D & F & 0 & \dots & \dots & 0 & H & 0 & \dots & \dots & 0 & I & I & 0 & \dots & \dots & 0 \\
 \vdots & \vdots & 0 & \ddots & \ddots & & & \ddots & \ddots & \ddots & & & \ddots & \ddots & \ddots & & & \vdots \\
 \vdots & D & \vdots & \ddots & F & \ddots & & \ddots & H & \ddots & & & \ddots & I & I & \ddots & & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & & \ddots & \ddots & & & \ddots & \ddots & & & & \ddots & \ddots & & & 0 \\
 \vdots & D & 0 & & & \ddots & F & \ddots & & \ddots & H & 0 & \dots & \dots & 0 & I & I & \theta_{ps,n} \\
 \vdots & 0 & J & \ddots & & & \ddots & K & \ddots & & \ddots & M & L & 0 & \dots & \dots & 0 & \theta_{w,0} \\
 \vdots & \vdots & 0 & \ddots & \ddots & & & \ddots & \ddots & & & \ddots & \ddots & \ddots & & & & \theta_{w,1} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & & & \ddots & \ddots & & & & \ddots & \ddots & & & & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & & \ddots & \ddots & & & \ddots & & & & & \ddots & \ddots & & & \theta_{w,k} \\
 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & J & 0 & \dots & \dots & 0 & K & 0 & \dots & \dots & 0 & M & L & \vdots \\
 P & 0 & R & \dots & R & \dots & R & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \theta_{w,n} & 0 \\
 & & & & & & & & & & & & & & & & & & OT
 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \theta_{ra} \\ \theta_{pa} \\ \theta_{rs,1} \\ \vdots \\ \theta_{rs,k} \\ \vdots \\ \theta_{rs,n} \\ \theta_{ps,1} \\ \vdots \\ \theta_{ps,k} \\ \vdots \\ \theta_{ps,n} \\ \theta_{w,0} \\ \theta_{w,1} \\ \vdots \\ \theta_{w,k} \\ \vdots \\ \theta_{w,n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_r \\ q_p \\ 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \tag{5-30}$$

$$P = 1 - \varphi/2 \tag{5-31}$$

$$R = \varphi/n \tag{5-32}$$

(4)-2 パネル表面温度分布と室内環境条件から冷水入口温度を求める

(4)-1 と同様に, (5-6)式に(5-22)式と(5-23)式と(5-25)式を組み込み, 入力値($OT, \Delta\theta_w$) を右辺に移項することで(5-37)式を得る。

パネル表面温度の分布が大きくなると居室内の放射環境が不均一になることが考えられる。これを防止するために, 天井放射パネルの1枚目とn枚目の表面温度の差を想定することが有効である。このような場面において, 用いることを想定している。

$$\begin{pmatrix}
 -1 & 0 & A & B & C & \dots & C & \dots & C & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\
 0 & -1 & B & A' & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & D & \dots & D & \dots & D & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\
 \vdots & 0 & C & 0 & E & 0 & \dots & \dots & 0 & F & 0 & \dots & \dots & 0 & G & G & 0 & \dots & 0 \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & & & \ddots & \ddots & \ddots & & & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & C & \vdots & \vdots & E & \ddots & & & \ddots & \ddots & \ddots & & & \ddots & \ddots & G & G & \ddots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & & & \ddots & \ddots & \ddots & & & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\
 \vdots & \vdots & C & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & E & 0 & \dots & \dots & 0 & F & 0 & \dots & \dots & 0 & G & G \\
 \vdots & \vdots & 0 & D & F & 0 & \dots & \dots & 0 & H & 0 & \dots & \dots & 0 & I & I & 0 & \dots & \dots & 0 \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 & \ddots & \ddots & & \ddots & \ddots & \ddots & & & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & D & \vdots & \ddots & F & \ddots & & \ddots & \ddots & \ddots & & & \ddots & \ddots & I & I & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & & \ddots & \ddots & \ddots & & & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\
 \vdots & \vdots & 0 & D & 0 & & \ddots & \ddots & & \ddots & \ddots & \ddots & & & \ddots & \ddots & H & 0 & \dots & \dots & 0 & I & I \\
 \vdots & \vdots & 0 & 0 & J & \ddots & \ddots & \ddots & & \ddots & \ddots & \ddots & & & \ddots & \ddots & \ddots & M & L & 0 & \dots & \dots & 0 \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & & \ddots & \ddots & \ddots & & & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & & \ddots & \ddots & \ddots & & & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & & \ddots & \ddots & \ddots & & & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & J & 0 & \dots & \dots & 0 & K & 0 & \dots & \dots & 0 & M & L & \vdots & \vdots & 0 \\
 0 & 0 & P & 0 & R & \dots & R & \dots & R & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \theta_{w,k} \\
 S & T & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots \\
 0 & \dots & \dots & 0 & -1 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \theta_{w,n}
 \end{pmatrix}
 \begin{pmatrix}
 q_r \\
 q_p \\
 \theta_{ra} \\
 \theta_{pa} \\
 \theta_{rs,1} \\
 \vdots \\
 \theta_{rs,k} \\
 \vdots \\
 \theta_{rs,n} \\
 \theta_{ps,1} \\
 \vdots \\
 \theta_{ps,k} \\
 \vdots \\
 \theta_{ps,n} \\
 \theta_{w,0} \\
 \theta_{w,1} \\
 \vdots \\
 \theta_{w,k} \\
 \vdots \\
 \theta_{w,n}
 \end{pmatrix}
 =
 \begin{pmatrix}
 0 \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 OT \\
 0 \\
 \vdots \\
 \Delta\theta_{rs}
 \end{pmatrix}$$

.....(5-37)

第5章 天井放射パネル空調性能予測手法

5.3 各種能力線図の導出例

5.2 節にて天井放射パネル特性行列の導出方法を示した。これらの方法を用いることで、ある条件を固定した時の天井放射パネルの冷却能力や送水温度などの設備仕様を決定することが可能である。前節においては一般化した形でこの方法を示した。本節においては、より具体的な活用方法について示す。

天井放射パネルの設置条件などの諸条件を想定し、天井放射パネル特性行列を作成し、様々な入力条件を与えて、それぞれの出力値を算出する。これにより、ある条件に対する設備仕様を導出することができる線図を作成することが可能である。本節において、以下の3つの線図（総称してパネル能力線図とする）を示す。

- (1) 空気温度・パネル表面温度から設備仕様決定のためのパネル能力線図
- (2) パネル表面温度分布から流量決定のためのパネル能力線図
- (3) 設計と条件からパネル形状決定のためのパネル能力線図

ここでは Fig. 5.3.1 と Fig. 5.3.2 に示すように、天井放射パネルの設置条件に関しては敷設率 60%を共通の条件とした。4.3 節と 2.3 節の実験で扱った天井放射パネル：フラットパネルとスリットパネルを想定する。スリット型放射パネルに関しては、1200×600 のパネルを用いた実験を行ってきたが、4.3 節のフラット型放射パネルと想定条件を合わせるために、1800×600 のパネルとして想定する。そのため、パネル内の配管の長さなどの形状は 1.5 倍して想定する。

Table 5.3.1 に、パネル能力線図を導出するパネルの設置条件を示す。これにより、各条件でのパネル能力線図の違いに着目する。

Table 5.3.2～5.3.5 に各条件でのパネル熱貫流率などの伝熱定数を示す。これらの定数から、A～D の条件における「(2)-1 負荷とパネル表面温度平均値から冷水入口温度を求める」で定義される天井放射パネル特性行列を用いて導出した。

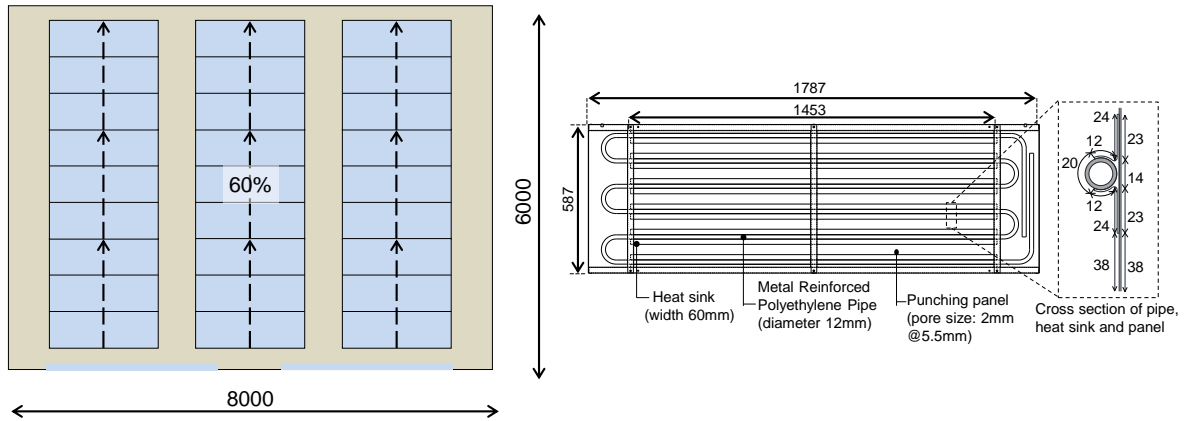


Fig. 5.3.1 想定する天井伏図とフラットパネル

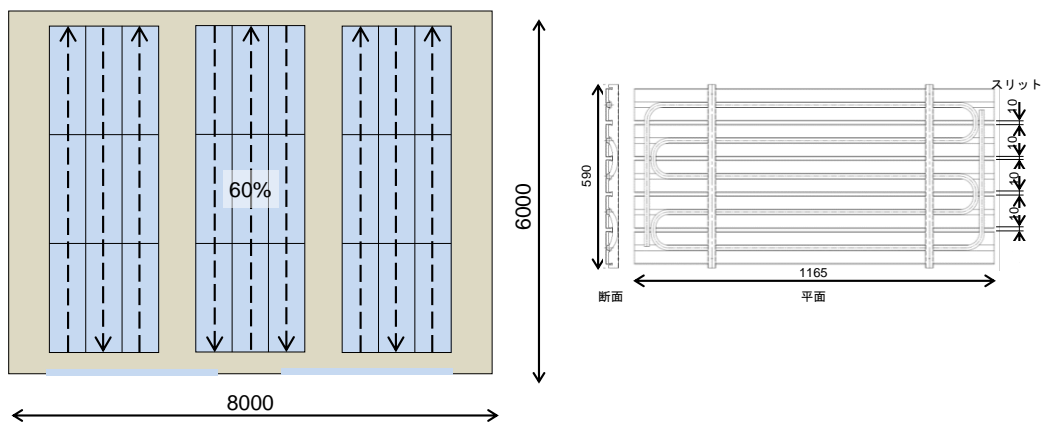


Fig. 5.3.2 想定する天井伏図とスリットパネル

Table 5.3.1 天井放射パネルの設置条件

条件名	天井放射パネル	敷設条件 (パネル以外の天井材)
A	フラットパネル	岩綿吸音板
B	スリットパネル	岩綿吸音板
C		ガラス繊維パルプ混抄シート
D		なし (スケルトン)

第5章 天井放射パネル空調性能予測手法

Table 5.3.2 天井放射パネルの種類と熱貫流率

パネル種別	K_r	K_p	K_{rps}
	W/mK	W/mK	WmK
フラットパネル	$0.058+0.0029 \log_n(Q_w)$	$3.772+0.6715 \log_n(Q_w)$	8400
スリットパネル	$0.2272+0.005 \log_n(Q_w)$	$3.853+0.812 \log_n(Q_w)$	15972

Table 5.3.3 天井放射パネルの種類と熱貫流率

パネル種別	n	S_p	L_p
	-	m ²	m
フラットパネル	3	0.85	8.72
スリットパネル	3	1.08	9.00

Table 5.3.4 天井放射パネルの敷設条件とパネル熱伝達率

パネル種別と敷設条件		α_r	α_p	α_{ad}
		W/m ² K	W/m ² K	W/mK
フラットパネル	天井材有	4.1+4.8	2.2+4.6	1.84
スリットパネル	天井材有	6.0+5.1	2.2+4.3	16.52
	スケルトン	7.8+5.2	2.2+4.2	10000

Table 5.3.5 天井放射パネル以外の天井材の条件

天井材の種類	K_c	S_c
	W/m ² K	m ²
岩綿吸音板	2.2	18.8
ガラス繊維パルプ混抄シート	4.1	18.8

5.3.1 空気温度・パネル表面温度から設備仕様決定のためのパネル能力線図

室内空気温度とパネル表面温度の平均値（1系統の3枚の平均表面温度）を最初に想定した際に、パネルの処理熱量と流量ごとの冷水温度を確認する能力線図である。

Fig. 5.4.3 に能力線図の使用例を示す。この能力線図は2種類の線が引かれている。一つ目は処理熱量である。これから、室温：27℃、パネル表面温度：21℃としたとすれば、室温とパネルの表面温度の差 ($\theta_{ra}-\theta_{rs}$) が 6.0℃となり、その際のパネル処理熱量が 64.4W/m²として求まる。さらに、2つ目は流量ごとの冷水入口温度を示す線である。これから、同様に $\theta_{ra}-\theta_{rs}$: 6.0℃のときに、流量が 1.8 l/min のときに冷水入口温度が 18.8℃で求まる。さらに、流量を 0.9 l/min とときには 17.9℃で求まる。これにより、従来の能力線図では求められない、室内環境条件とそれを満たす処理熱量と冷水入口温度と流量を求めることが可能となる。

条件 A, B, C 及び D での居室負荷率 1.0, 0.8, 0.6 での能力線図を、それぞれ Fig. 5.3.4～5.3.6, Fig. 5.3.7～5.3.9, Fig. 5.3.10～5.3.12 及び Fig. 5.3.13～5.3.15 に示す。基礎実験において、天井裏の負荷が大きいとき（居室負荷率が小さいとき）に処理能力が高くなること、この能力線図においても示されており、天井裏と居室の負荷の分布を考慮することができる。実験においてフラット型パネルに比べてスリット型パネルのほうが、負荷処理能力が高いこと、更にスリット型パネルにおいて、天井の密閉性が高い条件（岩綿吸音板、ガラス繊維混抄シート）に比べて開放性が高い条件（スケルトン）のほうが、負荷処理能力が高いことが、能力線図においても反映できており、パネルの種類や敷設条件を考慮して、設計条件を満たすための設備条件を比較することができる。

なお、D の能力線図である Fig. 5.4.20 においては、スケルトンとして天井材により天井裏空間と居室空間が仕切られていないため、天井裏と居室間の空気の移動による熱交換が促進されるため、Fig. 5.3.13～15 は、ほぼ同じ能力線図となる。

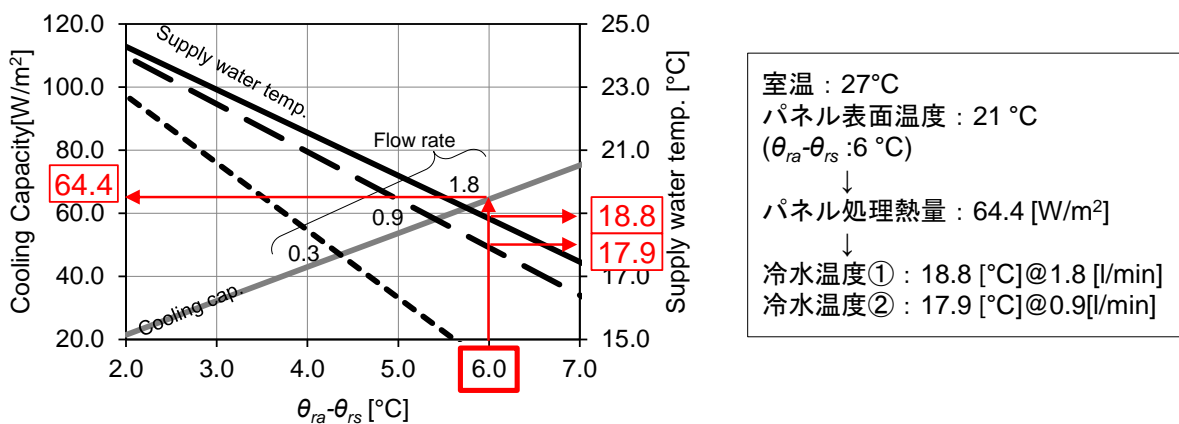


Fig. 5.4.3 能力線図使用例

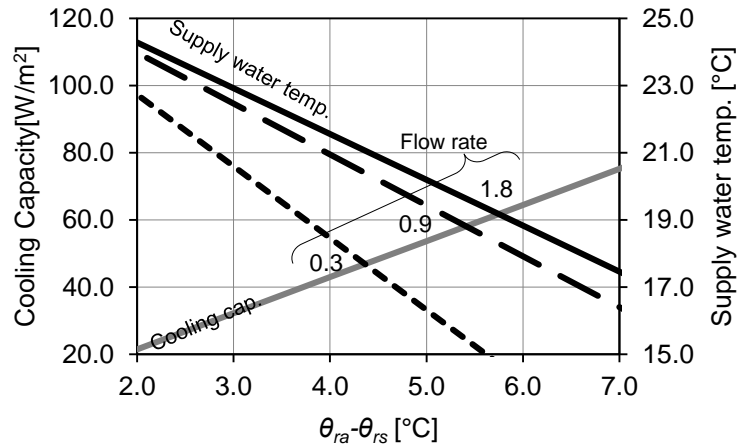


Fig. 5.3.4 能力線図(条件 A 居室負荷率:1.0)

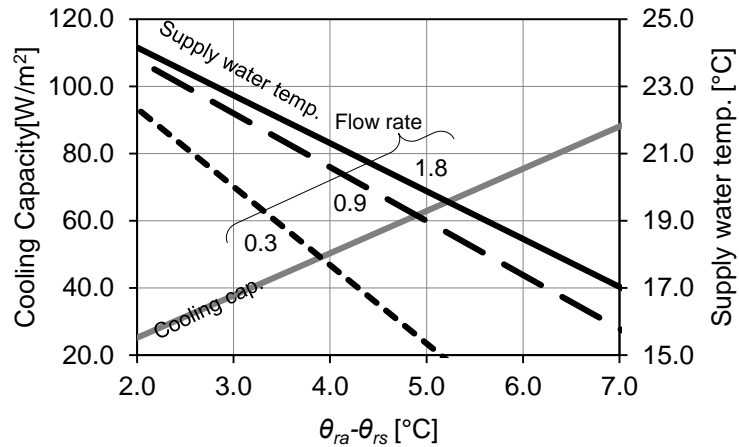


Fig. 5.3.5 能力線図(条件 A 居室負荷率:0.8)

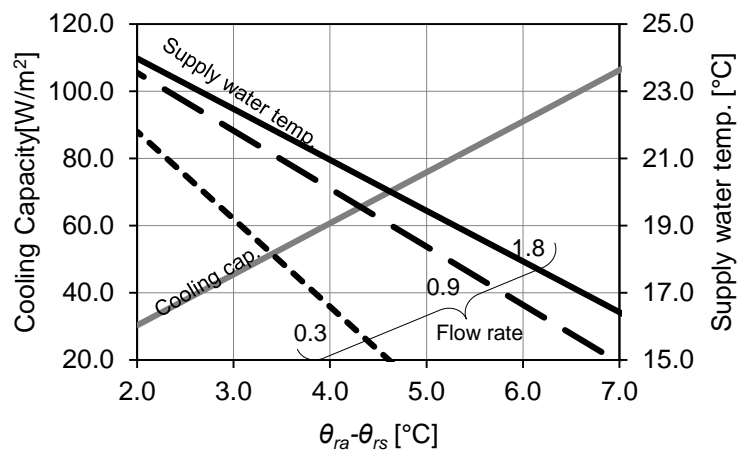


Fig. 5.4.6 能力線図(条件 A 居室負荷率:0.6)

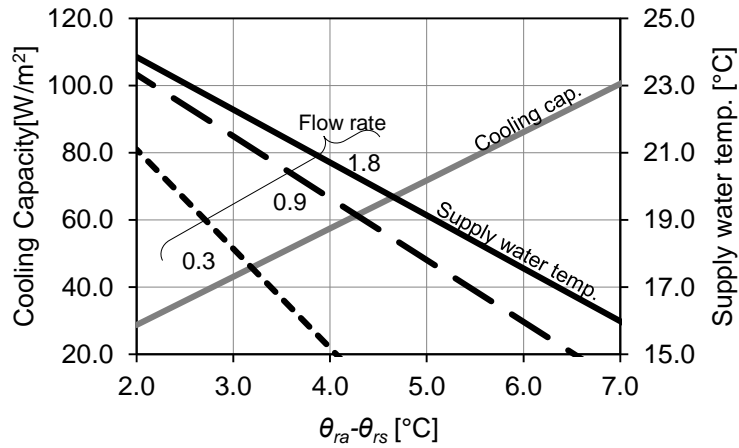


Fig. 5.3.7 能力線図(条件 B 居室負荷率:1.0)

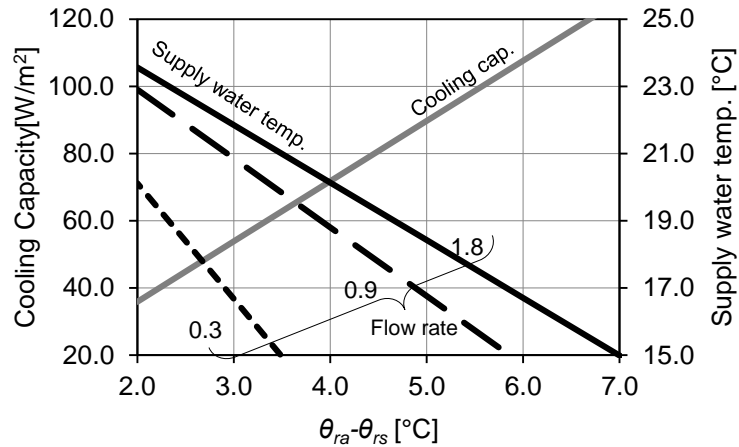


Fig. 5.3.8 能力線図(条件 B 居室負荷率:0.8)

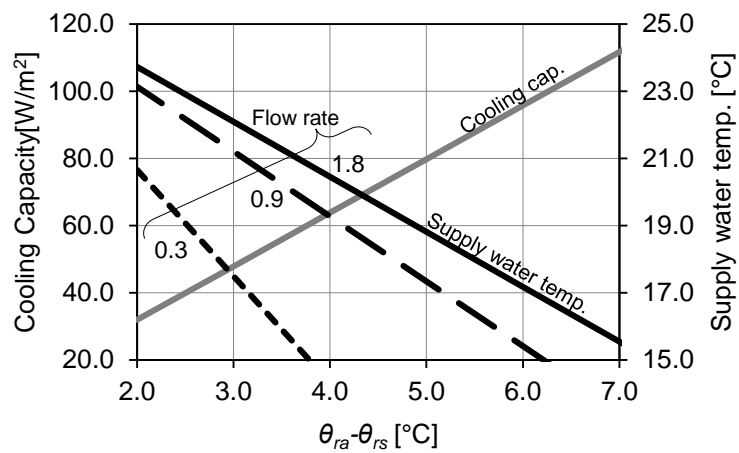


Fig. 5.4.9 能力線図(条件 B 居室負荷率:0.6)

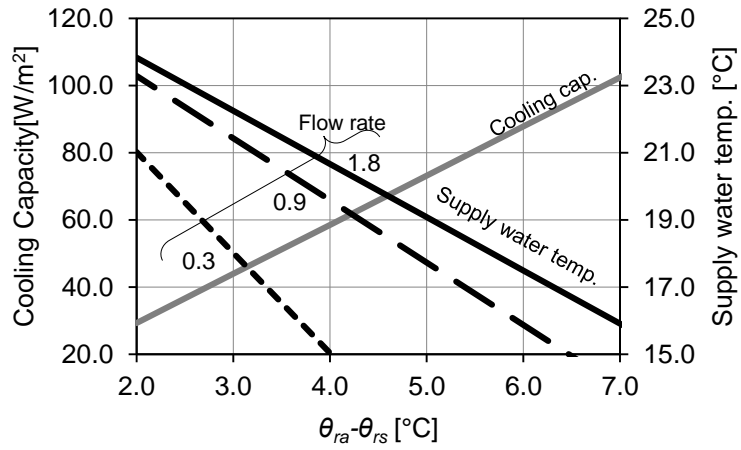


Fig. 5.3.10 能力線図(条件 C 居室負荷率:1.0)

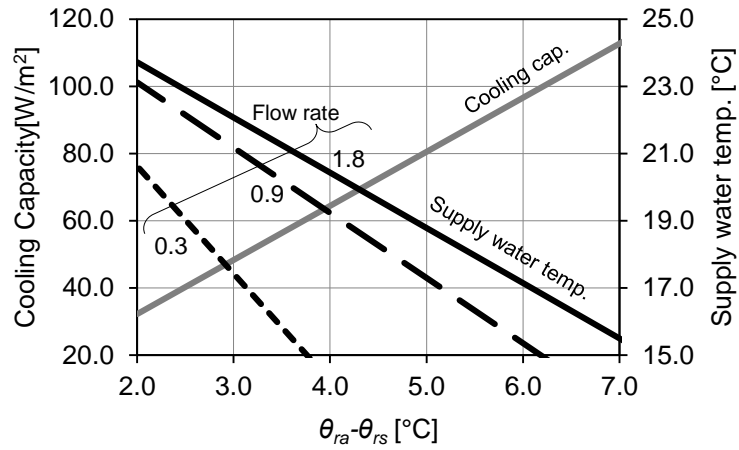


Fig. 5.3.11 能力線図(条件 C 居室負荷率:0.8)

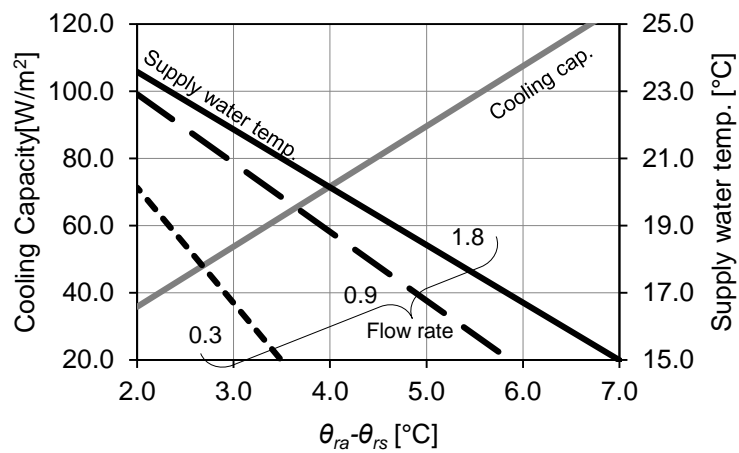


Fig. 5.4.12 能力線図(条件 C 居室負荷率:0.6)

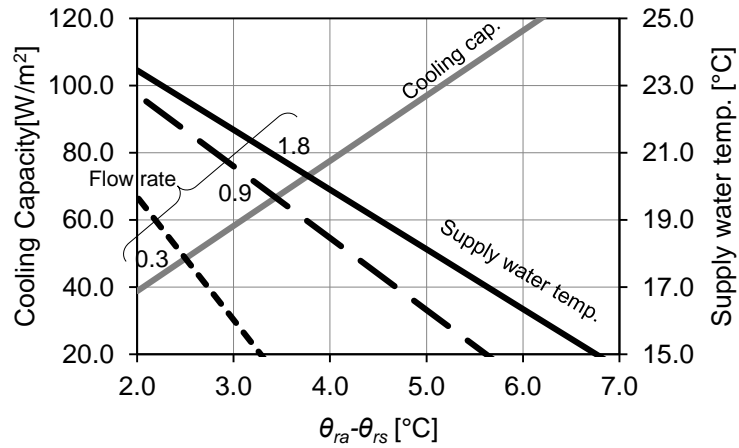


Fig. 5.3.13 能力線図(条件 D 居室負荷率:1.0)

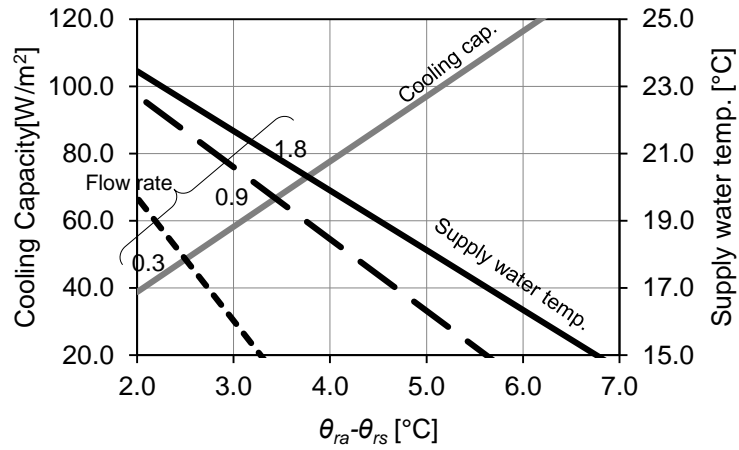


Fig. 5.3.14 能力線図(条件 D 居室負荷率:0.8)

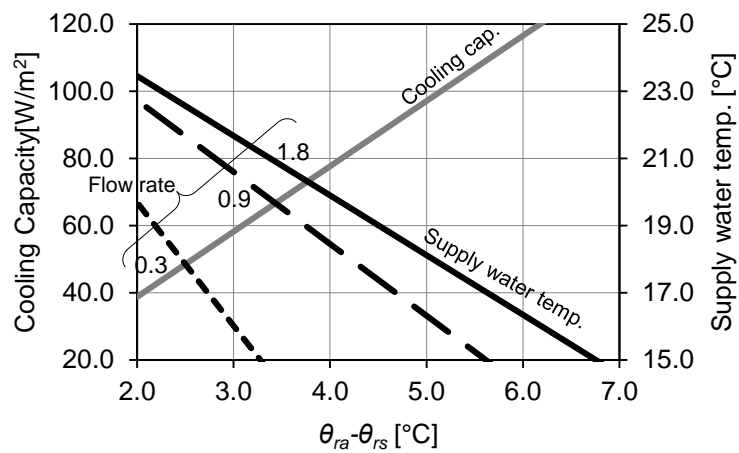


Fig. 5.4.15 能力線図(条件 D 居室負荷率:0.6)

第5章 天井放射パネル空調性能予測手法

5.3.2 パネル表面温度分布から流量決定のための能力線図

天井放射パネル空調において、パネル間の表面温度差が大きくなると、居室内の平均放射温度の分布が大きくなってしまふ。表面温度分布が図らずも大きくなり、居室内の温熱環境が不快となることを防ぐために、設計の際に事前に入口側のパネルと出口側のパネル表面温度差がどの程度つくかを決めて、その際の流量と冷水入口温度を確認することが、必要となる。そこで、ある室内温熱環境条件とパネルの表面温度分布から流量と冷水入口温度を決定するための能力線図をこの項では示す。

Fig. 5.4.16 に、この能力線図の使用例を示す。この能力線図には2種類の線がある。1つ目はパネル表面温度差と流量の関係を表す線で、2つ目は所定のパネル表面温度差を満たす流量とその時の冷水入口温度の関係を表す線である。例えば、パネル間の表面温度差を 2°C にしたいとき、更に、居室負荷率が1.0のとき、パネル表面温度差と流量の関係を表す線から、流量： 0.7l/min が求まる。ここで求められた流量の 0.7l/min から冷水入口温度： 17.0°C が求まる。居室負荷率毎に流量を決定することが可能である。

条件 A, B, C 及び D での能力線図をそれぞれ Fig. 5.3.17, Fig. 5.3.18, Fig. 5.3.19 及び Fig. 5.3.20 に示す。ここでは一例として、居室空気温度： 27.0°C 、パネル表面温度平均値： 22.0°C の条件での能力線図を示す。流量が大きいほどパネル表面温度差が小さくなっており、理にかなった結果となっている。条件 D の能力線図である Fig. 5.4.20 においては、スケルトンとして天井材により天井裏空間と居室空間が仕切られていないため、天井裏と居室間の空気の移動による熱交換が促進されるため、2種類の線は居室負荷率に依存しない。

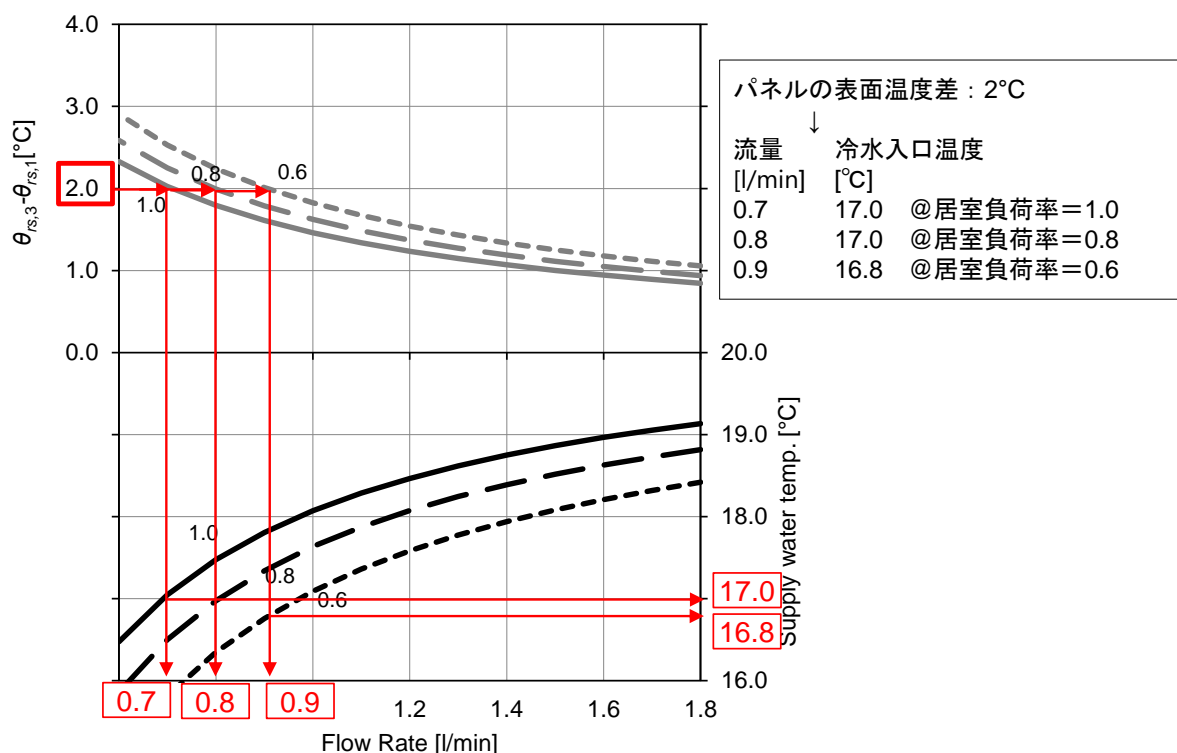


Fig. 5.4.16 能力線図使用例

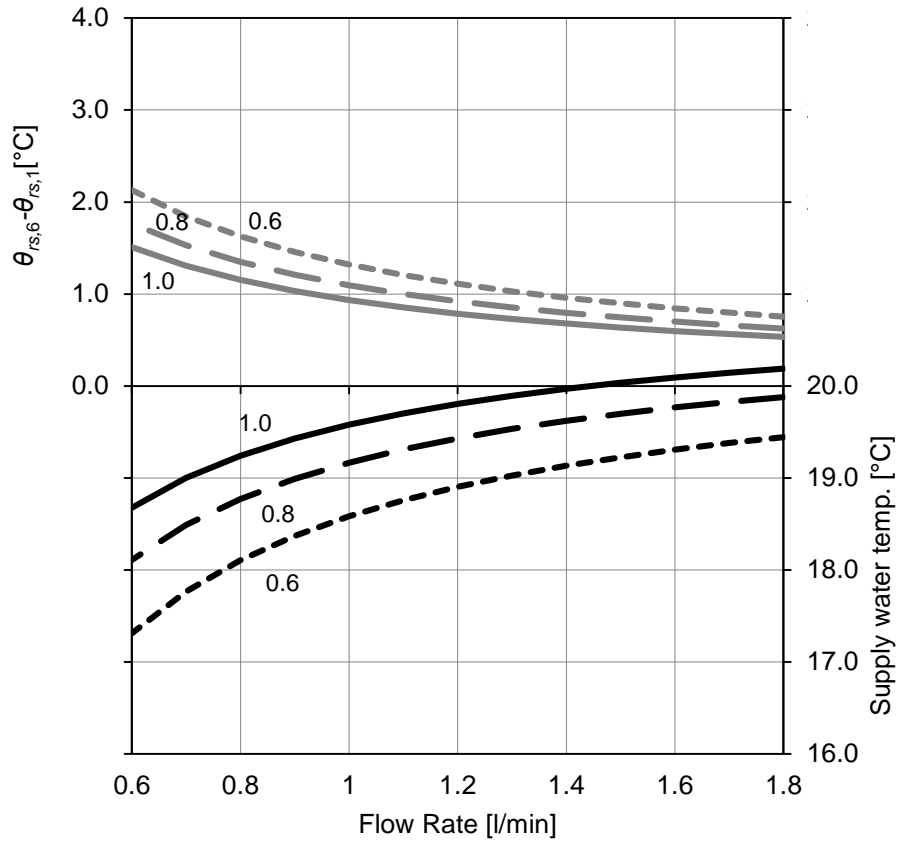


Fig. 5.3.17 能力線図(条件 A 図内数値は居室負荷率)

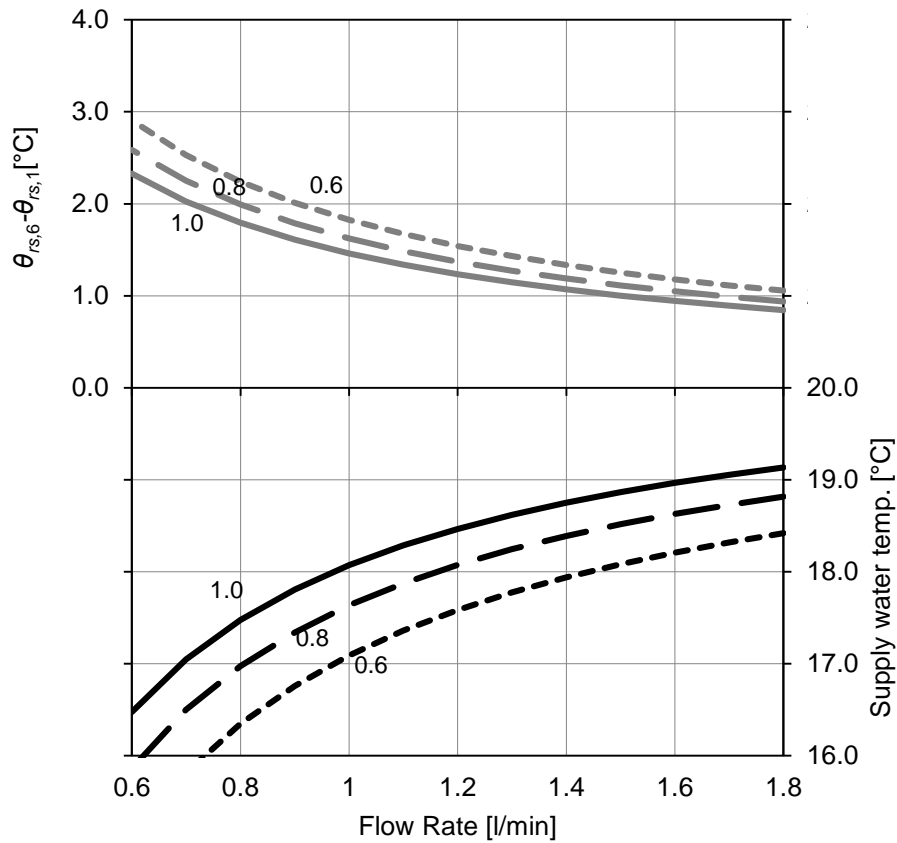


Fig. 5.3.18 能力線図(条件 B 図内数値は居室負荷率)

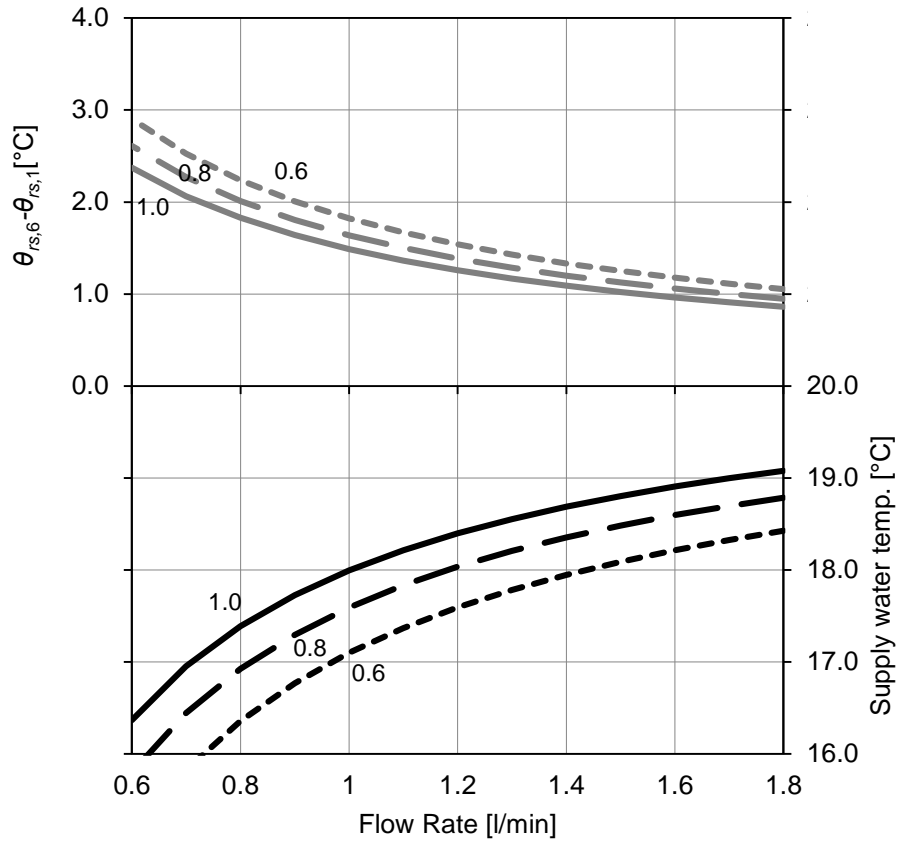


Fig. 5.3.19 能力線図(条件 C 図内数値は居室負荷率)

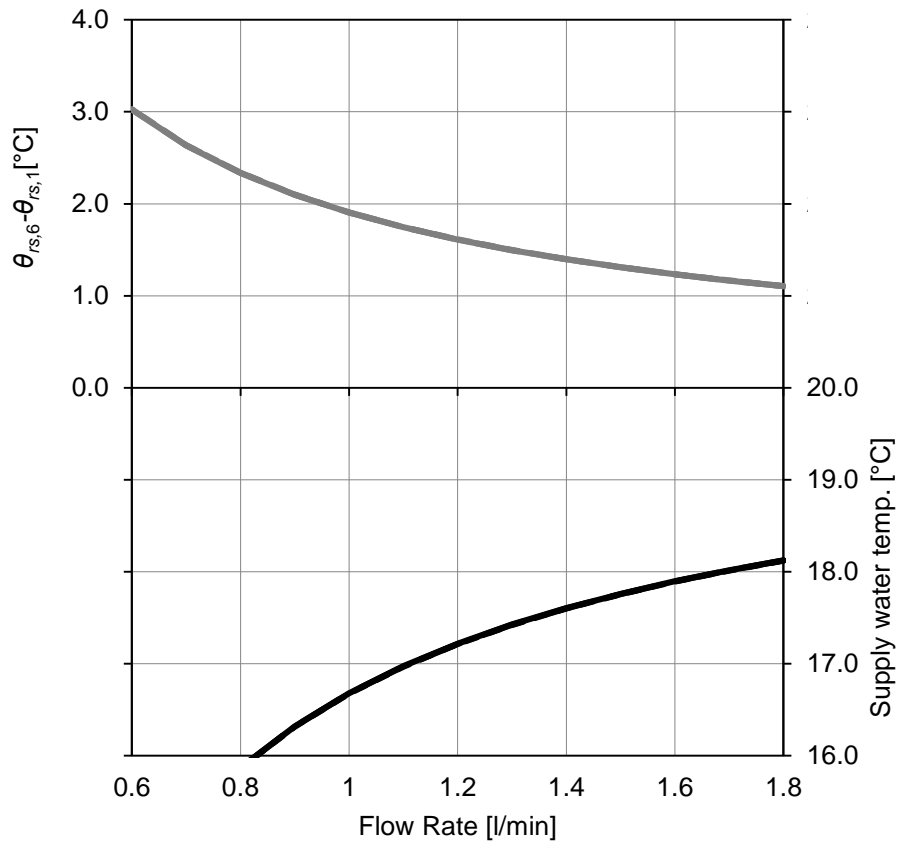


Fig. 5.3.20 能力線図(条件 D)

5.3.3 設計と条件からパネル形状決定のための能力線図

設計仕様に従って、空調機においてコイルの列数や配管の本数を決定するように、適正な設備容量で設計するためには天井放射パネルの形状を決定する必要がある。そこで、パネルに組み込む配管の長さを決定する能力線図を考案した。

Fig. 5.4.21 に、この能力線図の使用例を示す。この能力線図は、パネル配管長さと負荷処理能力の関係を示すものであり、ここでは条件 A, B, C 及び D での比較が行えるようになっている。例えば、天井放射パネルの必要処理能力が 80W/m^2 とした場合、条件 A では 8.0 m 、条件 B, C では 6.8 m 、条件 D では 5.6 m の配管長さが必要であることが明確になる。天井放射パネルの形状や設置条件のポテンシャルに応じで、天井放射パネルの必要配管長さを決定することができ、適正な天井放射パネルの設計が可能となる。ここでは条件 D が 4 つの条件の中で一番短くても済むことが示されている。条件 B, C では概ね等しくなり、ここで想定した条件（岩綿吸音板とガラス繊維シート）においては、天井材の断熱性はそこまで大きく寄与しないことが示されている。

Fig. 5.4.22, 5.4.23 及び 5.4.24 に、それぞれ居室負荷率 1.0, 0.8 及び 0.6 での能力線図を示す。居室負荷率が小さくなるほど、線が上方に移動していることが分かる。

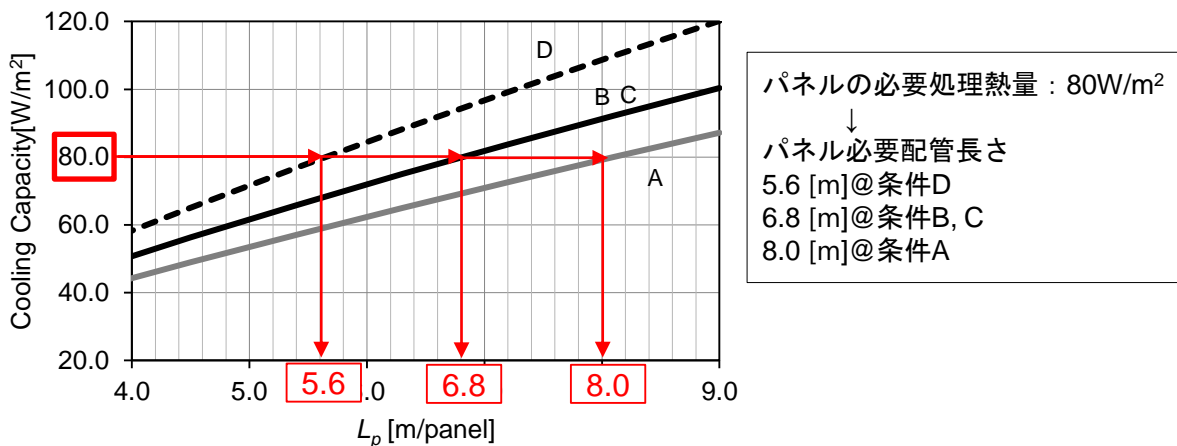


Fig. 5.4.21 能力線図使用例

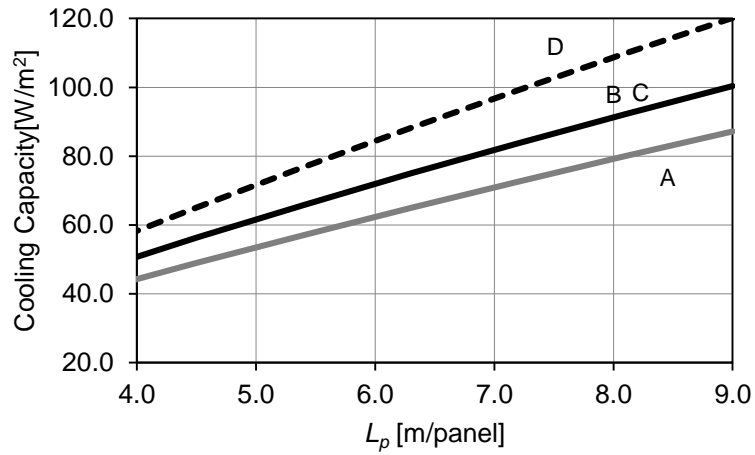


Fig. 5.4.22 能力線図(居室負荷率 1.0)

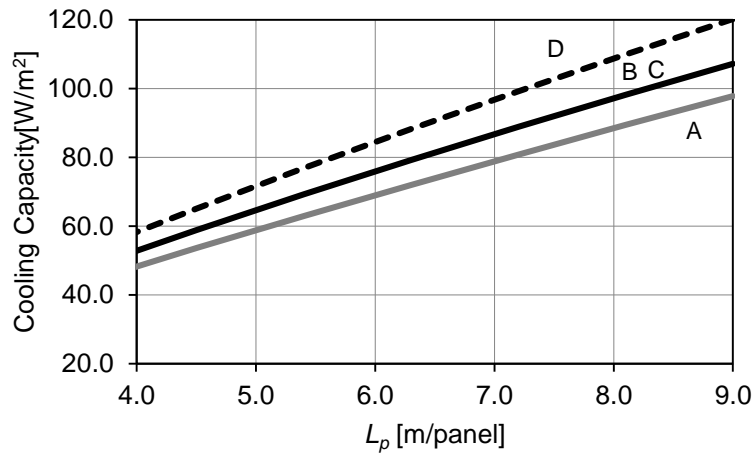


Fig. 5.4.23 能力線図(居室負荷率 0.8)

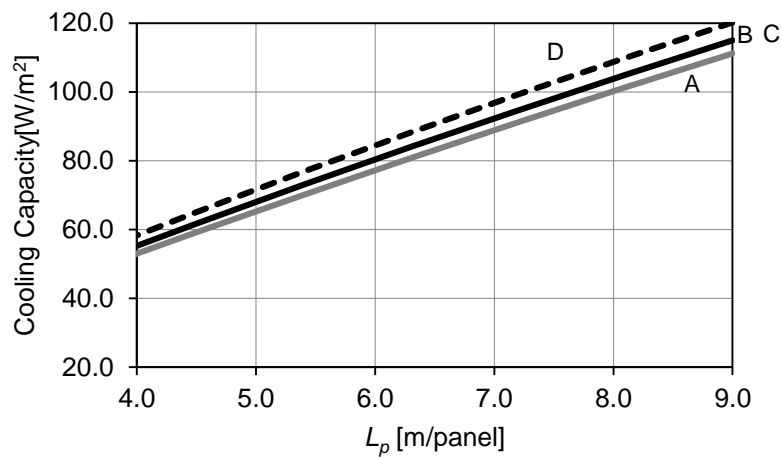


Fig. 5.4.24 能力線図(居室負荷率 0.6)

5.4 まとめ

本章において、熱収支モデルにおける各変数、各定数の設計段階での位置づけを明確化し、連立方程式の解法を示した。さらに設計仕様を決定する際に有用な情報を提示することが可能な能力線図を導出し、能力線図の活用方法について示した。これにより、天井放射パネル空調性能予測手法の有用性を示した。

本章においては、設計時に天井放射パネルの能力の把握する方法について示してきた。ここで、天井放射パネルで処理すべき負荷をどのように見込むかが、課題となる。そこで、次章では、天井放射パネル空調の熱負荷特性を把握する。

参考文献

- 1) EN 14240: Ventilation for buildings – Chilled ceilings – Testing and rating, European Committee for Standardization, 2004.
- 2) 放射（輻射）冷暖房協会: ARCH 2017 CHTRS Ver. 1.1 天井放射冷暖房パネル性能試験規格書, 2018.5

第6章 天井放射パネル空調の熱負荷計算手法の提案
と熱負荷特性の把握

6.1 既往研究の課題と本章の位置づけ

建築物の熱負荷は、設計時に空調システムの仕様を決定する際の必須の情報であり、熱負荷計算は空調システム設計の根幹となる。我が国においては国土交通省監修の建築設備設計基準¹⁾において、熱負荷計算方法が示されているが、従来の対流式空調を前提とした計算手法である。また、天井放射空調システムの設計手順は示されているものの、天井放射空調に即した負荷計算に関する記述はない。天井放射パネル空調は天井表面を冷却するため、対流式空調と熱移動形態が異なるため、ここで示される熱負荷計算方法を用いて、天井放射パネル空調の設計を行う際には、安全率を考慮することなどの対応が必要であり、注意を要する。

一方で、ASHRAE Handbook²⁾においては、天井放射パネル空調の設計条件を決める手順などが示されている。さらに、放射パネルが放射源として、居室の表面として扱う必要があり、熱負荷計算を行う際は、各居室内表面の熱収支を計算する Heat balance method (以下、HB) を用いる必要があると示唆している。

この指摘に着目して、Feng らは、HB と Radiant time series method (以下、RTS) を比較している³⁾。RTS は、放射による熱取得が遅れを伴って熱負荷となることを考慮した係数 (Radiant time factor) を導入した応答係数法の一つであり、応答係数法を用いて、天井放射空調の熱負荷を計算する際には適した手法であると考えられる。実験で得られた熱負荷の経時変化と HB と RTS の計算結果を比較し、HB が精度良く計算が可能であることを示している。さらに、この研究を発展させ、対流空調と天井放射空調の冷房負荷に関する考察を行っている⁴⁾。ここでは、放射パネル方式 (Radiant cooling panel: RCP)、仕上げ埋込方式 (Embedded surface cooling system: ESCS)、スラブ打込方式 (Thermally active building system: TABS) の3つの代表的な天井放射空調方式を挙げている。それぞれの方式において、対流空調との比較により、熱負荷の特性の把握を試みており、対流空調よりも、いずれの天井放射空調方式の熱負荷のほうが大きいことを導いている。ただし、放射パネル方式の設置方法に関しては、パネル上部の空間がない場合に限られている。我が国においては、梁を有する建物構造の制約上、天井裏空間を有する建築が一般的であり、天井裏の影響を考慮に入れていないこれらの研究成果をそのまま適用することはできない。

既に述べてきたように、実験により天井放射パネルの能力に敷設条件や天井裏の熱負荷が影響を及ぼすことを示してきた。さらに、天井放射パネル空調が処理する熱負荷及び室内環境を予測するためのモデル化方法 (天井放射パネル空調熱収支モデル) を提案した。上記の課題を鑑み、本研究において、天井放射パネル空調熱収支モデルを応用し、熱回路網プログラムによる天井放射パネル空調の熱負荷計算手法を提案する。

本章では、まず初めに熱負荷計算手法の提案に先立ち熱回路網プログラムの熱負荷計算プログラムとしての妥当性の検証のために、ASHRAE Standard 140 による検証について示す。次に熱回路網による天井放射パネルのモデル化方法を示す。熱回路網プログラムによる天井放射パネル空調と対流式空調の熱負荷特性の違いに着目したケーススタディを示す。

6.2 熱回路網計算プログラムの検証

6.2.1 熱回路網プログラムの概要

Fig. 6.2.1 は本論文で用いる熱回路網プログラム⁵⁾ (以下, Nets とする) のモデルの一例である。この熱回路網モデルは, 空調機を有する単室における空気, 表面, 物体内の温度を予測可能なモデルである。熱回路網モデルは節点と各節点をつなぐ熱抵抗により構成されている。節点は, (1) 熱容量を有するものと (2) 表面や各部材の境界を設定するもの, (3) 気象条件などを設定する温度が固定されたものの 3 種類がある。さらに, 熱抵抗は, (1) 伝熱, (2) 対流, (3) 放射, (4) 移流の 4 つの熱の移動形態を設定することができる。各節点において熱収支を解くことで, 温度を計算することが可能となる。

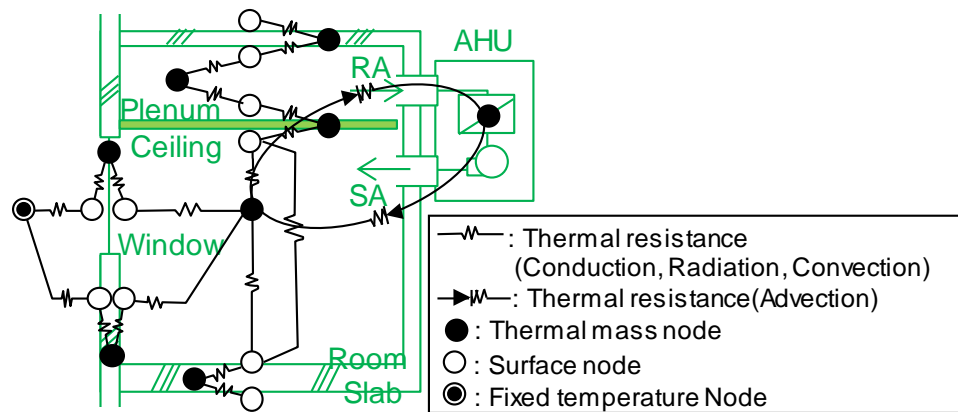


Fig. 6.2.1 熱回路網プログラムモデル化方法

6.2.2 熱回路網の数学モデルと解法の概要

一般に, 未知数の温度を持つ節点が n 個あるとして, i 番の節点で熱流の熱収支式は次のような節点方程式で表される⁶⁾。

$$\sum_{j=1}^n m_{i,j} \cdot \dot{x}_j = \sum_{j=1}^{n+n_0} c_{i,j} \cdot (x_j - x_i) + \sum_{j=1}^{n_g} r_{i,j} \cdot g_j \dots\dots\dots (6-1)$$

また, 上記の節点方程式は下式のようにベクトル表記で, 常微分方程式にて表記することが可能である。⁶⁾

$$M \cdot \dot{\mathbf{x}} = C \cdot \mathbf{x} + C_0 \cdot \mathbf{x}_0 + R \cdot \mathbf{g} = C \cdot \mathbf{x} + \mathbf{f} \dots\dots\dots (6-2)$$

この方程式を後退差分法により解くことで, 各節点の温度を算出することが可能となる。

第6章 天井放射パネル空調の熱負荷計算手法の提案と熱負荷特性の把握

6.2.3 ASHRAE Standard 140 に基づく検証パターン

Nets の検証のために、ASHRAE Standard 140-2011⁷⁾ (以下、AS140 とする) による他プログラムとの熱負荷計算値の比較を行った。AS140 は建物のエネルギーシミュレーションプログラムの検証のために開発され、多くの検証ケースが定義されている。建物モデルは非常に単純なものが定義されており、例えば Fig. 6.2.2 のような単室のモデルが規定されている。多くのシミュレーションプログラムによる計算結果が用意されており、検証を行うシミュレーションプログラムと計算結果を比較することが可能となっている。これにより、検証対象シミュレーションプログラムの妥当性の検証を行うことができる。

本研究においては、建物の熱負荷計算に関する基本検証ケース (basic test) を行った。Table 6.2.1 にそれぞれのテストケースの入力条件を示す。入力パラメータとしては窓方位、日除け、建物の熱容量と断熱性能である。Fig. 6.2.3 に壁、床、屋根の構成を示す。

Table 6.2.2 に各テストケースの設定温度、冷暖房スケジュール等の制御条件を示す。各検証パターンでの制御は、Case 600, 610, 620, 630, 900, 910, 920 と 930 は連続空調、Case 640 と 940 はセットバック温度制御、Case 650 と 950 は夜間換気、Case 600FF と 900FF は非空調を想定したパターンである。

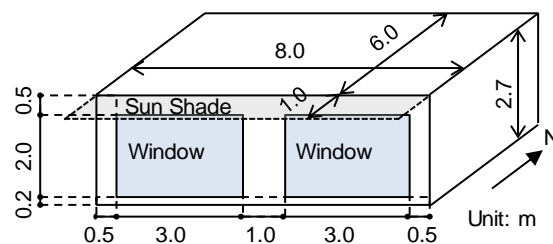


Fig. 6.2.2 建築モデル

Table. 6.2.1 テストケースの入力条件

Low mass basic test			Heavy mass basic test		
Case	Windows	Sunshade	Case	Windows	Sunshade
600, 600FF	south ×2	-	900, 900FF	south ×2	-
610	south ×2	Overhang	910	south ×2	Overhang
620	east, west	-	920	east, west	-
630	east, west	Overhang, Fin	930	east, west	Overhang, Fin
640	south ×2	-	940	south ×2	-
650	south ×2	-	950	south ×2	-

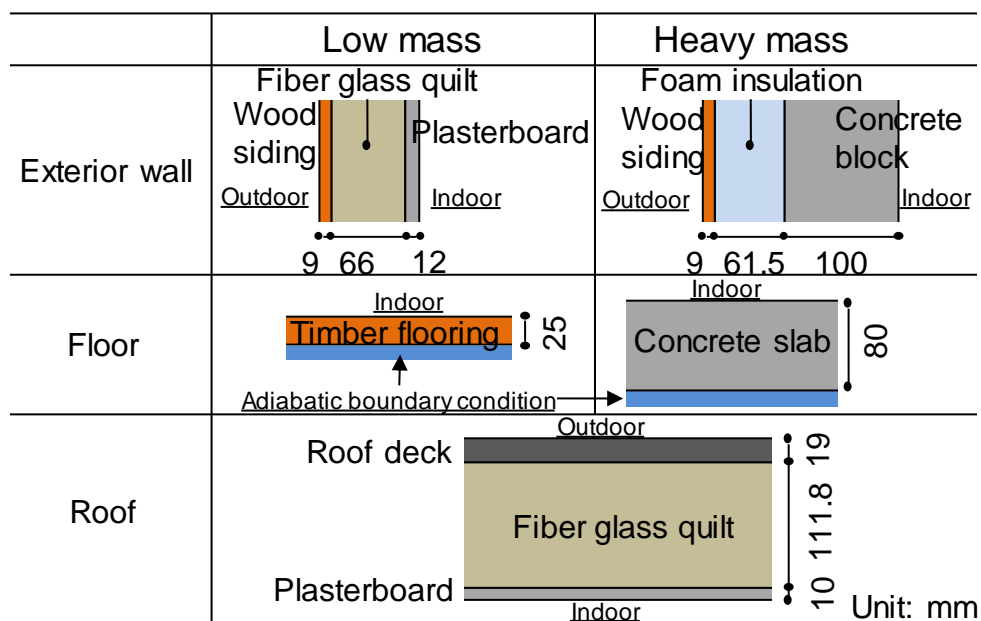


Fig. 6.2.3 建築部材構成

Table 6.2.2 各ケースでの制御方法・温度設定値

Case	Heating	Cooling	Ventilating
600, 610, 620, 630, 900, 910, 920, 930	0:00~24:00	0:00~24:00	0:00~24:00
	<20°C: on Otherwise: off	>27°C: on Otherwise: off	Off
	23:00~7:00	0:00~24:00	0:00~24:00
640, 940	<10°C: on Otherwise: off	>27°C: on Otherwise: off	Off
	7:00~23:00 <20°C: on Otherwise: off		
	0:00~24:00	0:00~24:00	18:00~7:00 On
650, 950	Off	>27°C: on Otherwise: off	7:00~18:00 Off
	600FF, 900FF	Always:Off	

第6章 天井放射パネル空調の熱負荷計算手法の提案と熱負荷特性の把握

気象条件はコロラドのデーンバーの気象データを用いている。Fig. 6.2.4, Fig. 6.2.5 にそれぞれ外気温度（日最高・平均・最低気温），日射量（日積算水平面全天日射量）を示す。

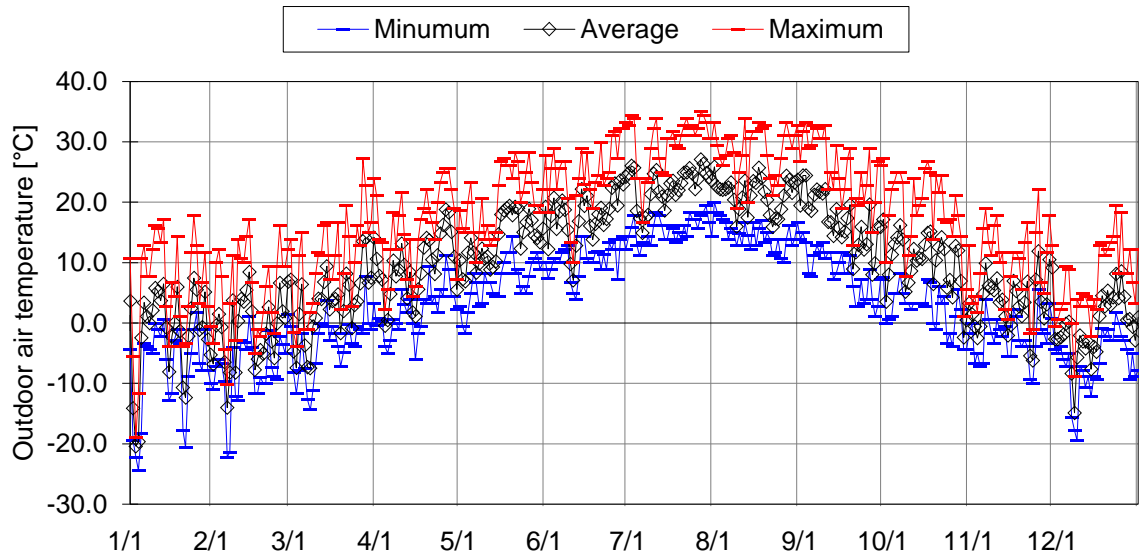


Fig. 6.2.4 ASHRAE Standard 140 における外気温条件

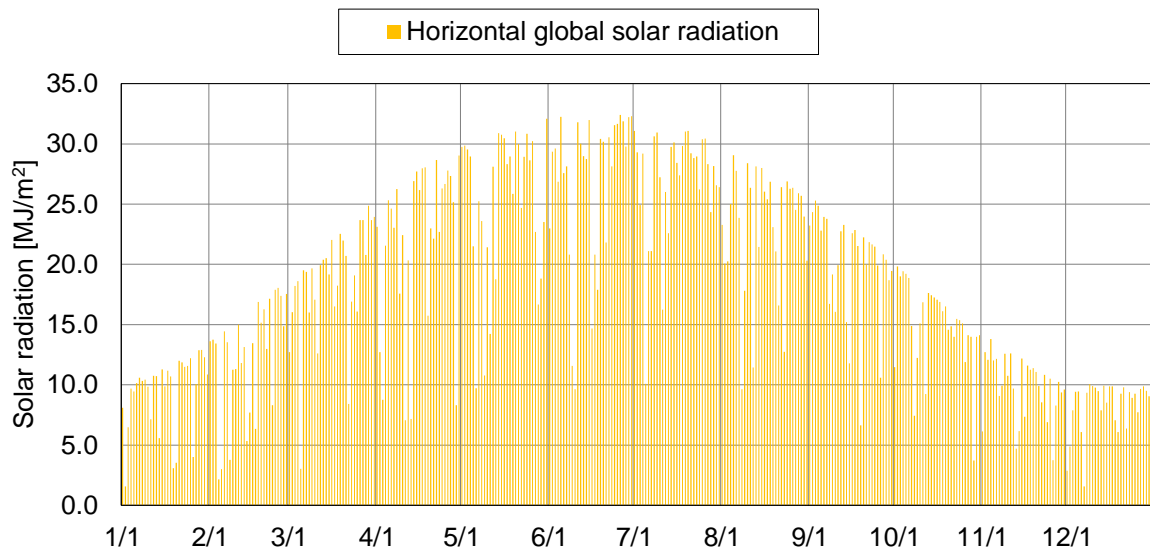


Fig. 6.2.5 ASHRAE Standard 140 における日射条件（日積算水平面全天日射量）

6.2.4 熱回路網モデル概要

Fig.6.2.6は検証パターンの建物条件に合致するように構築されたNetsの熱回路網モデルを示している。さらに、このモデル内に制御条件が考慮され、冷暖房負荷が算出される。

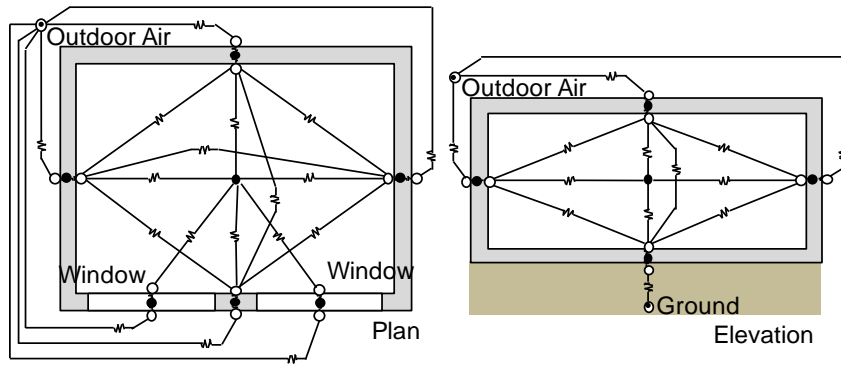


Fig. 6.2.6 熱回路網モデル（建物全体）

Fig. 6.2.7 は壁体の熱回路網モデルを模式的に示したものである。代表例として、西側外壁を示している。

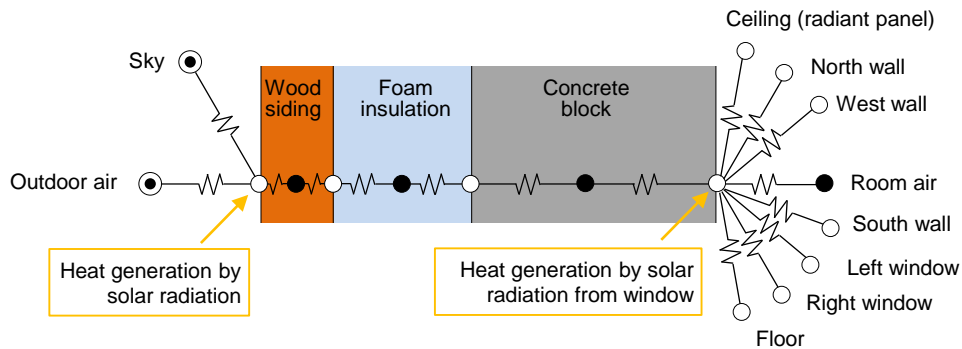


Fig. 6.2.7 壁体の熱回路網モデル（西壁，代表例）

外気と外壁表面との熱移動は、総合熱伝達率（29.3 W/m²K）により想定している。天空と外気側表面との間の熱移動は、夜間放射量から天空温度を求め、天空温度と外気側表面との間の熱移動は放射熱伝達を想定している。壁体内の伝熱に関しては、壁体の各部材中心部に熱容量有の節点（図中の●）、各部材の界面に熱容量ゼロの節点（図中の○）を設定し、それぞれを各部材に対応する熱伝導率を設定している（抵抗記号）。

室内側表面と室内空気との間の熱移動は対流熱伝達を想定しており、熱流の向きや壁体の設置場所により、以下に示す所定の温度差に関する対流熱伝達関数を設定している。

- ・ 熱流の方向が上向きの場合（床面や放射パネルの天井面など）

$$\alpha_c = 2.63\Delta\theta^{0.25} \dots\dots\dots (6-3)$$

第6章 天井放射パネル空調の熱負荷計算手法の提案と熱負荷特性の把握

- ・ 熱流の方向が下向きの場合（天井裏面など）

$$\alpha_c = 1.33\Delta\theta^{0.25} \dots\dots\dots (6-3)$$

- ・ 熱流の方向が水平の場合（壁面など）

$$\alpha_c = 3.35 + 0.093\Delta\theta \quad (\Delta\theta \leq 15.0^\circ\text{C}) \dots\dots\dots (6-4-1)$$

$$\alpha_c = 2.56\Delta\theta^{0.25} \quad (\Delta\theta > 15.0^\circ\text{C}) \dots\dots\dots (6-4-2)$$

また、これを(6-1)式における一般化熱コンダクタンス $C_{i,j}$ にて表記すると、 α_c に面積を乗じた以下の(6-5)式のようになる。

$$C_{i,j} = \alpha S_{i,j} \dots\dots\dots (6-5)$$

室内側表面と他の壁・天井・床・窓ガラスとの間の熱移動は放射熱伝達を想定している。表面間の放射熱伝達に関しては、20.0 °C 表面での放射熱伝達率 α_r を想定して下式にて想定している。

$$\alpha_r = 0.04\varepsilon_i\varepsilon_j C_b (X_m/100)^3 \dots\dots\dots (6-6)$$

$$C_b = 5.67 \text{ [W/(m}^2\text{K}^4)] \dots\dots\dots (6-7)$$

$$X_m = (293 + 293)/2 \text{ [K]} \dots\dots\dots (6-8)$$

また、これを(6-1)式における一般化熱コンダクタンス $C_{i,j}$ にて表記すると、 α_r に面積と形態係数を乗じた以下の(6-9)式のようになる。

$$C_{i,j} = \alpha_r S_{i,j} \phi_{i,j} \dots\dots\dots (6-9)$$

本モデルでの各壁面間の形態係数を Table 6.2.3 に示す。

外気側表面で日射から受熱する表面に関しては、傾斜角、方位角及び日射吸収率により、時々刻々変化する日射受熱量が発熱量として与えられる。室内側表面に関しては、窓ガラスから透過した日射が発熱量として与えられる。

Fig. 6.2.8 は窓ガラスの熱回路網モデルを模式的に示したものである。熱伝達及び熱伝導に関しては、壁体と同様としている。

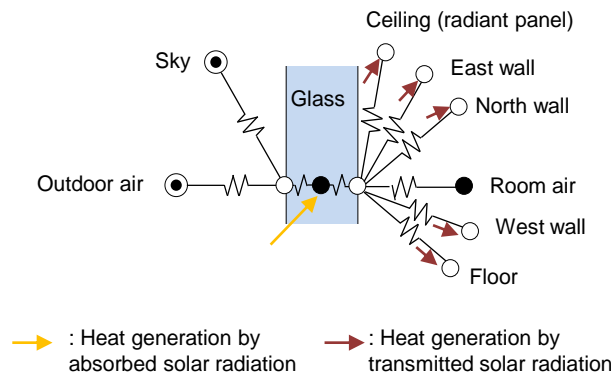


Fig. 6.2.8 窓ガラスの熱回路網モデル

第6章 天井放射パネル空調の熱負荷計算手法の提案と熱負荷特性の把握

ガラスが吸収する日射及び透過する日射に関しては、入射角特性を考慮している。吸収日射量はガラスの中心に発熱量として与えられ、外気側と室内側へ熱伝達により放熱される。透過日射量は室内の各壁面に所定の比率（日射分配率）で分配される。Table 6.2.4 に、本シミュレーションモデルで想定している日射分配率を示す。

Table 6.2.3 形態係数と面積・放射率（居室側）

		j						Area m ²	Emissivity -	
		1	2	3	4	5	6			
i	1	floor		0.56	0.34	0.34	0.35	0.35	48	0.9
	2	ceiling	0.56		0.34	0.34	0.35	0.35	48	0.9
	3	east wall	0.09	0.09		0.06	0.10	0.10	13.2	0.9
	4	west wall	0.09	0.09	0.06		0.10	0.10	13.2	0.9
	5	north wall	0.13	0.13	0.13	0.13		0.10	17.6	0.9
	6	south wall	0.13	0.13	0.13	0.13	0.10		5.6	0.9

Table 6.2.3 形態係数と面積・放射率（居室側）

		j						Area m ²	Emissivity -	
		1	2	3	4	5	6			
i	1	ceiling		0.87	0.44	0.44	0.45	0.45	48	0.9
	2	slab	0.87		0.44	0.44	0.45	0.45	48	0.9
	3	east wall	0.03	0.03		0.01	0.04	0.04	3	0.9
	4	west wall	0.03	0.03	0.01		0.04	0.04	3	0.9
	5	north wall	0.04	0.04	0.05	0.05		0.02	4	0.9
	6	south wall	0.04	0.04	0.05	0.05	0.02		4	0.9

Table 6.2.4 日射分配率

	Floor	Ceiling	East wall	West wall	North wall
日射分配率	0.642	0.168	0.038	0.038	0.053

6.2.5 検証結果

Fig. 6.2.9 は各検証パターンでの年間冷暖房負荷の Nets による計算結果と AS140 に示されている他プログラムの計算結果の比較検証結果である。Fig. 6.2.10 と Fig. 6.2.11 はそれぞれ Case 600 と Case 900 の代表日 (1/4) における冷暖房負荷の経時変化を示している。Fig. 6.2.12 と Fig. 6.2.13 はそれぞれ Case 600FF と Case 900FF の代表日 (1/4) における室温の経時変化を示している。年間冷暖房負荷は他プログラムの計算結果の範囲内に収まっている。冷暖房負荷と室温の変動もほぼ範囲内に収まっている。これにより, Nets の熱負荷計算プログラムとしての妥当性を示すことができた。

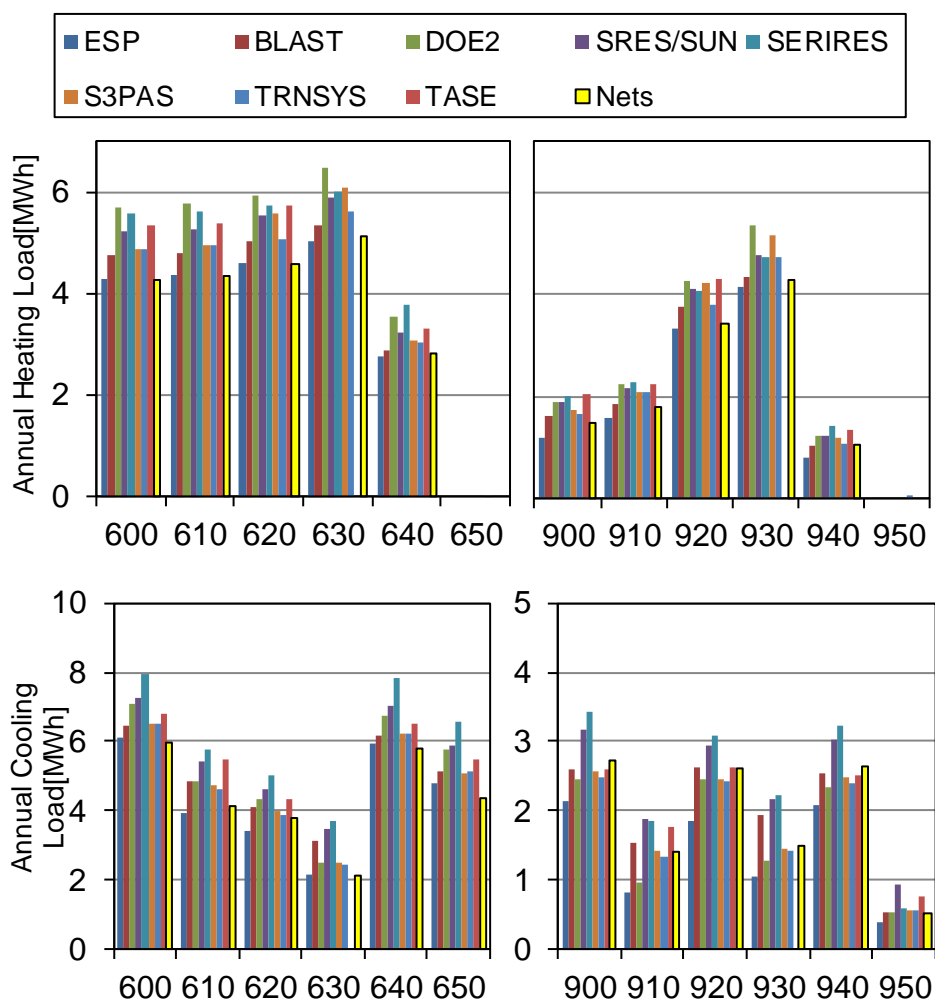


Fig. 6.2.9 年間冷暖房負荷比較結果

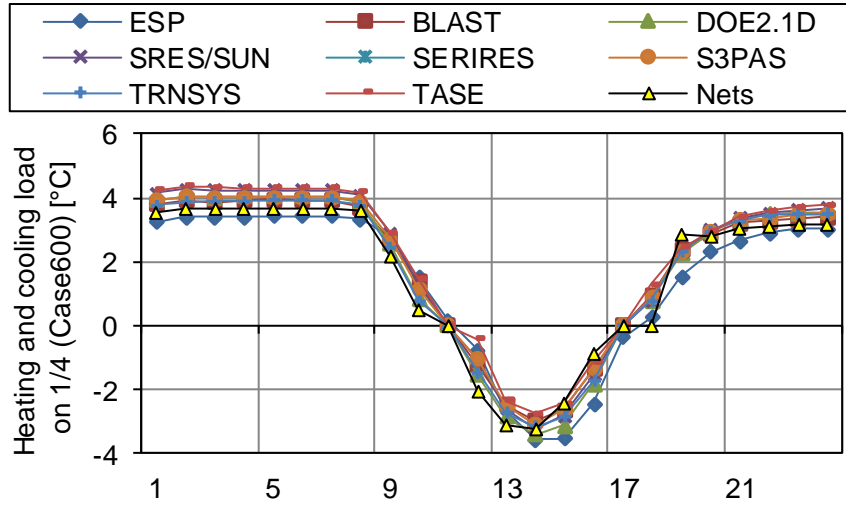


Fig. 6.2.10 Case 600 代表日での熱負荷経時変化

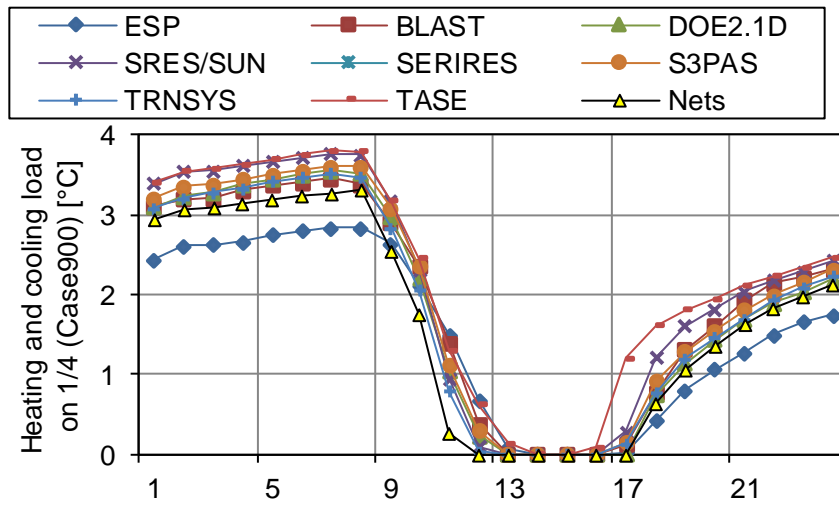


Fig. 6.2.11 Case900 代表日での熱負荷経時変化

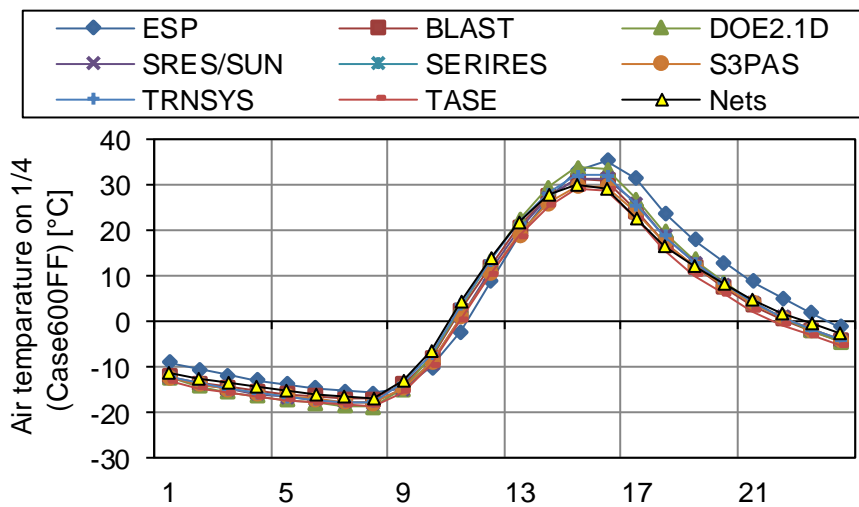


Fig. 6.2.12 Case600FF 代表日での自然室温経時変化

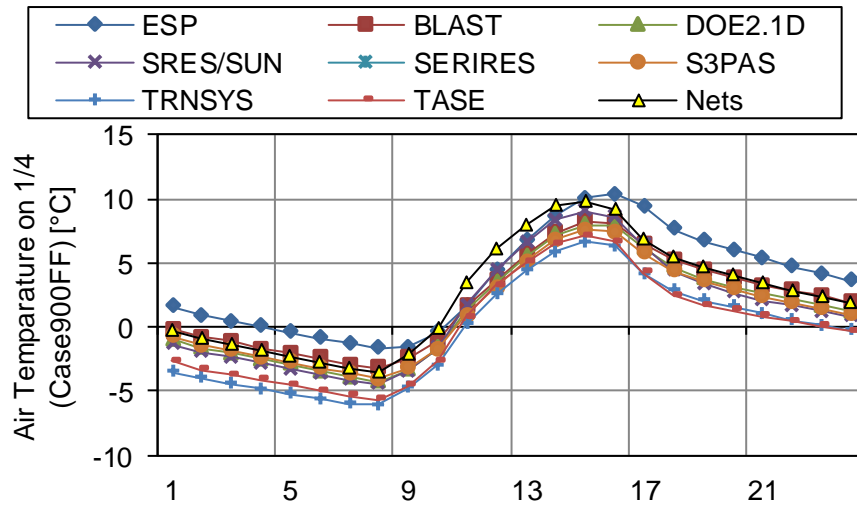


Fig. 6.2.13 Case900FF 代表日での自然室温経時変化

6.3 ケーススタディの条件と熱負荷計算方法

6.3.1 想定建物

前項と同様に ASHRAE Standard 140 で提示されている熱負荷計算テストの建物モデルを参考にして想定した。Fig. 6.3.1 は想定建物の平面と断面を示している。天井全面に放射パネルにより敷設され、天井裏空間を有している。

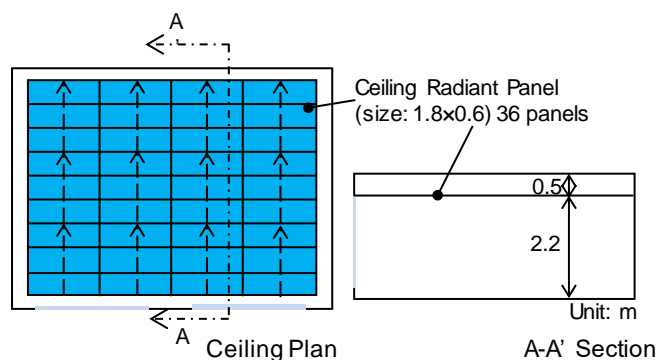


Fig. 6.3.1 想定建物の平面図と断面図

6.3.2 計算条件

Table 6.3.1 にシミュレーションパターンを示す。パラメータとして、空調方式、制御対象、建築仕様を設定した。空調方式は一般的な空気搬送による空調方式（対流方式）と天井放射空調（放射方式）を想定した。制御対象は居室の空気温度と作用温度（空気温度と平均放射温度（MRT）の平均値）を設定した。設定温度はともに 26.0 °C とした。建築仕様は熱容量と断熱性、日除けをパラメータとして設定した。

Table 6.3.1 シミュレーションパターン

No.	略称	空調方式	制御対象	建築仕様		
				熱容量	断熱性	日除け
1.	CAV-Air	対流	空気温度	大	低	無
2.	RAD-Air	放射				
3.	CAV-OT	対流	作用温度	小	高	有
4.	RAD-OT	放射				
5.	CAV-LW	対流		大	低	
6.	RAD-LW	放射				
7.	CAV-High Ins.	対流	大	高	有	
8.	RAD-High Ins.	放射				
9.	CAV-Sunshade	対流	大	低	有	
10.	RAD-Sunshade	放射				

各壁体の構成は ASHRAE Standard 140 で設定されるものを用いる (Fig. 6.2.3)。また、Table 6.3.2 に各建築仕様での壁体の熱物性値（熱貫流率（K 値）と熱容量）を示す。熱容量の大きいパターンと小さいパターンで 5~10 倍程度の差がある。断熱性の高いパターンでは低いパターンと比べて断熱材の熱伝導率を半分に設定し、断熱性能を向上させたパターンを設定した。日除けに関しては Fig. 6.2.2 に示す外壁から 1m 張り出した庇を想定した。

Table 6.3.2 壁体の熱物性値比較

No.		1~4, 9, 10		5, 6		7, 8	
建築仕様	熱容量	大		小		大	
	断熱性	低		低		高	
熱物性		K 値	熱容量	K 値	熱容量	K 値	熱容量
		[W/m ² K]	[kJ/m ² K]	[W/m ² K]	[kJ/m ² K]	[W/m ² K]	[kJ/m ² K]
外壁		0.512	144.8	0.514	14.5	0.287	144.8
床		0.039	112.0	0.039	19.5	0.039	112.0
屋根		0.318	18.2	0.318	18.2	0.168	18.2

気象データは拡張アメダス気象データ（1991 - 2001）を用い、地域は東京とした。シミュレーション期間は7/1~7/31とし、空調の運転時間は8:00~18:00とする。Fig. 6.3.2 と Fig. 6.3.3 にそれぞれ計算対象期間での外気温度条件と日射量条件を示す。

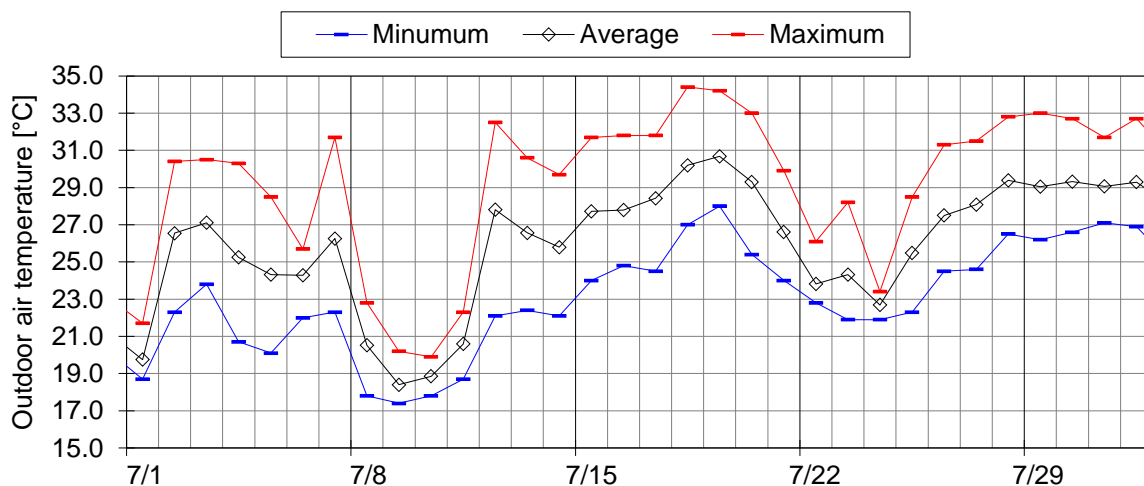


Fig. 6.3.2 外気条件（7/1~7/31）

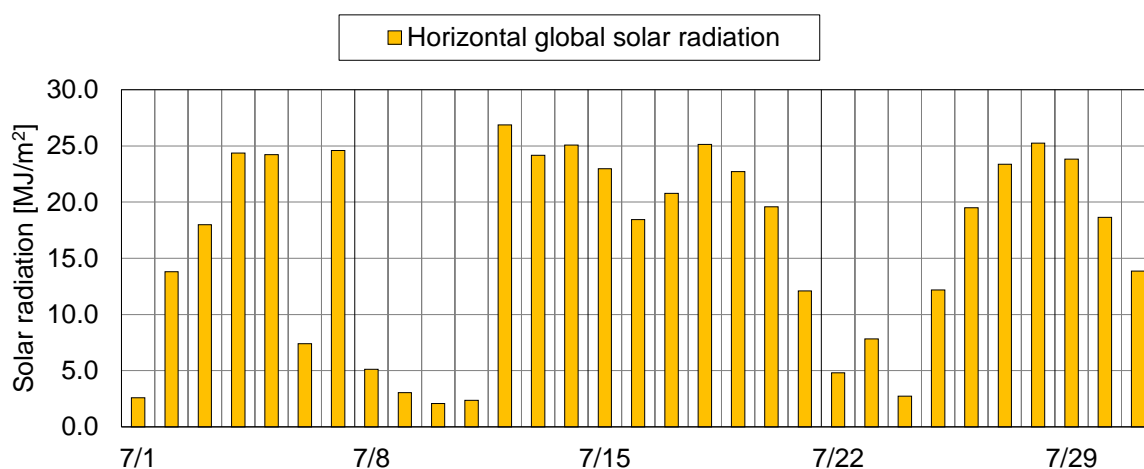


Fig. 6.3.3 日射条件（7/1~7/31）

6.3.3 建築及び天井放射パネルのモデル化方法

第 4 章で述べた天井放射パネルのモデル化方法をもとに、天井放射パネル空調の熱負荷を計算するためのモデルを構築した。天井放射パネル放熱特性検証基礎実験により、天井放射パネルにより冷却された天井裏の空気が居室の熱負荷処理に寄与するが示されており、この効果を考慮するために、Fig. 6.3.4 に示すように、天井裏と居室を熱抵抗により接続した。これにより、天井裏と居室間の伝熱と移流による熱移動を考慮可能とした。

冷水と天井放射パネル間の熱移動を考慮するために、5 章で示した天井放射パネルの伝熱モデルを上記で示した建物モデル内に組み込んだ。実験により得られたパネル熱貫流率を天井放射パネルモデルに設定した。Fig. 6.3.5 に示すように、1 系統内に 3 枚の天井放射パネルが連結され、合計 12 系統にて天井放射パネルが敷設されていることを想定している。1 系統内に連結された 3 枚の放射パネルをモデル化するために、天井放射パネル伝熱モデルの冷水の節点を移流熱伝達コンダクタンスにより循環回路を構築し、冷水の循環をモデル化した。3 枚の放射パネルの平均値を天井裏側及び居室側の天井の表面に与えた。

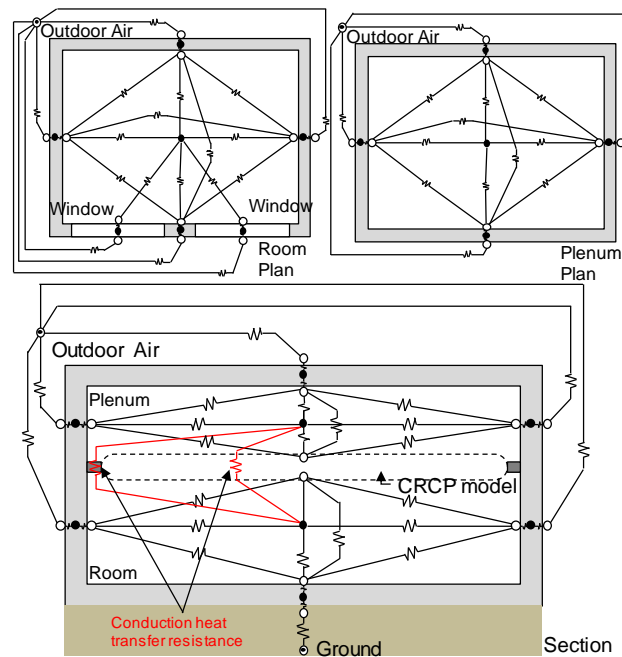


Fig. 6.3.4 天井放射パネル空調の熱回路網によるモデル化方法

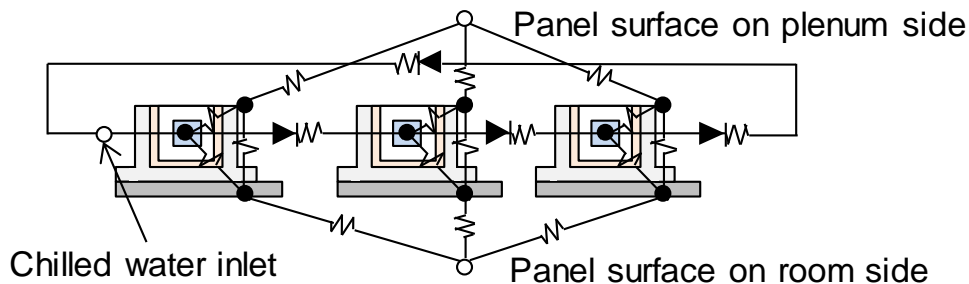


Fig. 6.3.5 放射パネルの熱回路網モデル

第6章 天井放射パネル空調の熱負荷計算手法の提案と熱負荷特性の把握

その他、前述の建築仕様に対応して、居室、天井裏に各節点での熱容量と各節点間の熱コンダクタンスを設定する。各節点での温度を非定常計算にて求める。また、窓面からの日射透過についても設定している。

6.3.4 天井放射空調の負荷計算方法

放射パネルへの送水水量は 21.6 l/min ($1.8 \text{ l/min} \times 12$ 系統) とする。空気温度あるいは作用温度が設定温度となるように冷水の入口温度を PID コントローラにより制御される。

6.3.5 一般対流空調の計算方法

Fig. 6.3.6 に対流式空調における熱回路網モデルを示す。空調機モデルを前記の天井放射空調用の熱回路網モデルに追加することで、一般対流式空調方式の計算を可能としている。天井放射パネルには通水は行わないが、天井の熱抵抗の条件を同一とするために天井放射パネルが敷設されていると想定した。風量は $780 \text{ m}^3/\text{h}$ 、定風量可変給気温度制御 (CAV) 方式を想定している。空気温度あるいは作用温度が設定温度となるように給気温度を PID コントローラにより制御される。

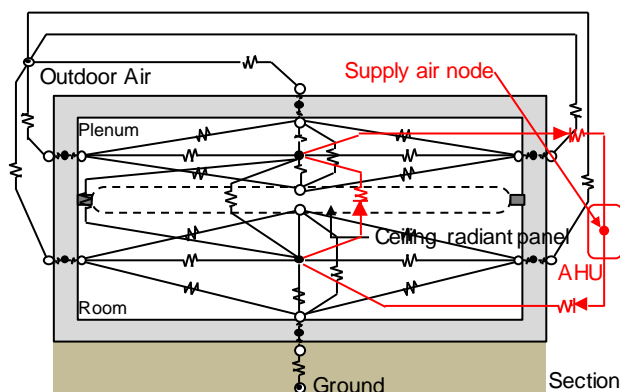


Fig. 6.3.6 一般空調方式の熱回路網モデル

6.4 シミュレーション結果

6.4.1 天井放射空調と一般対流空調の比較

① No. 1 と 2 の比較（制御対象：空気温度）

Fig.6.4.1 に月間最高気温を記録した 7/19 を代表日とし、代表日における制御対象を居室の空気温度としたときの室内環境と負荷の時系列変化を示す。（以降、本節で示すシミュレーション結果はすべて 7/19 におけるものとする。）室内（Room）の空気温度は立ち上がりを除きほぼ 26.0 °C に保たれており、良好な制御が再現できていると考えられる。天井裏（Plenum）の空気温度は放射方式の方が対流方式よりも最大で 3.5 °C 低く、放射パネルにより天井裏が冷却されており、2 章の実験や 3 章での実測で得られた結果を再現できている。放射方式の方が負荷は大きくなっている。

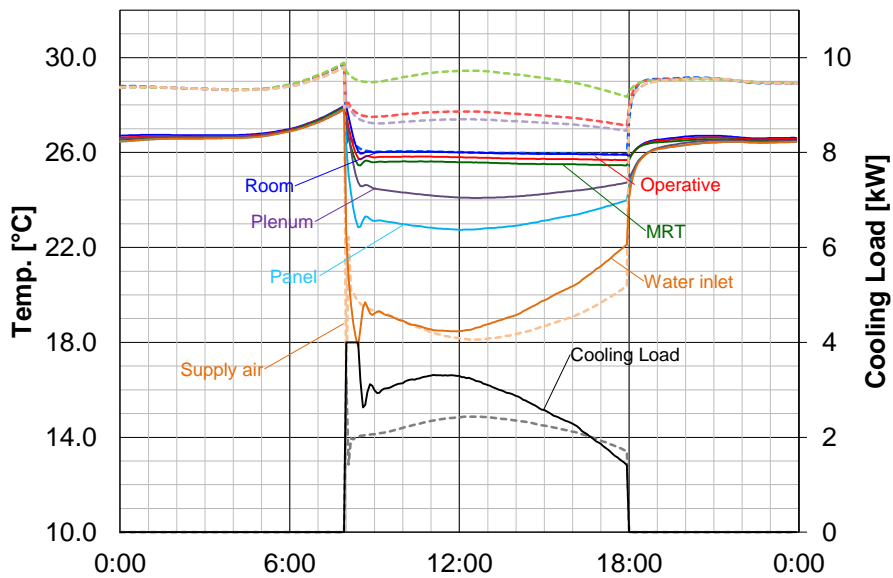


Fig. 6.4.1 制御対象を空気温度としたときの室内環境及び負荷時系列変化 (実線:放射方式, 点線:対流方式)

②No. 3 と 4 の比較（制御対象：作用温度）

Fig. 6.4.2 に制御対象を作用温度としたときの室内環境と負荷の時系列変化を示す。放射方式と対流方式で作用温度を制御対象とすることで温熱環境として同等の環境での比較となっていると考えられるが、放射方式の方が負荷は大きい。ただし、給気温度（Supply air）が冷水入口温度（Water inlet）と比べて4.0 °C程度低く、熱源の運用を考慮にいれて評価を行えば、放射方式の方がエネルギーとしては有利となると考えられる。

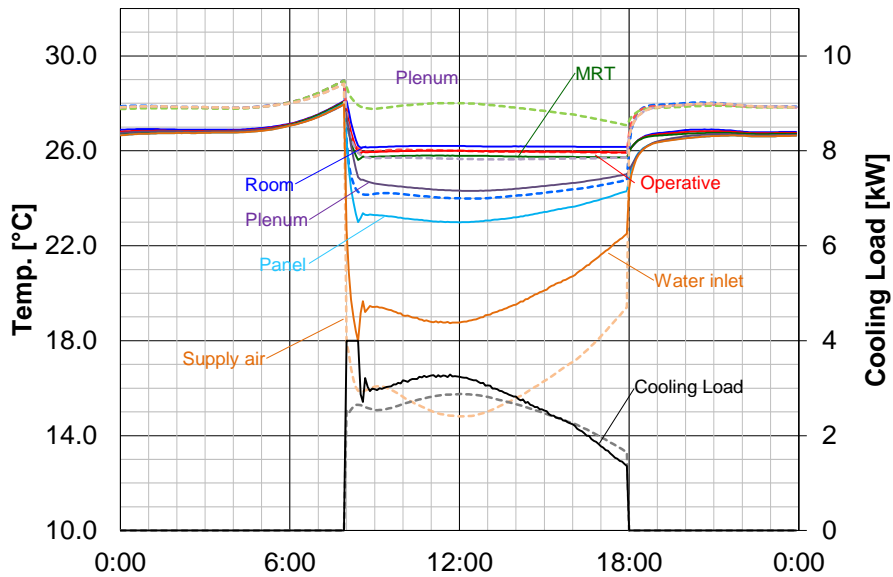


Fig. 6.4.2 制御対象を作用温度としたときの室内環境及び負荷時系列変化 (実線:放射方式, 点線:対流方式)

③熱流の内訳の比較

Fig. 6.4.3 に代表日での日積算熱流の内訳の比較を示す。各項目に示す部位は熱流の発生部を示している。対流方式は各表面から居室空気への熱流，放射方式は各表面と空気からの放射パネル表面への熱流である。制御対象を空気温度としたとき放射方式において居室側の熱流の合計に関しては対流式の熱流合計とほぼ等しいが，天井裏側の熱流（Plenum air, Roof, Plenum wall）が追加されることで，放射パネル表面への熱流が対流方式よりも大きくなっていることが示されている。制御対象を作用温度とした場合でも同様である。これより，放射パネルの負荷を計算する際には天井裏の影響を適切に考慮することの重要性が示された。

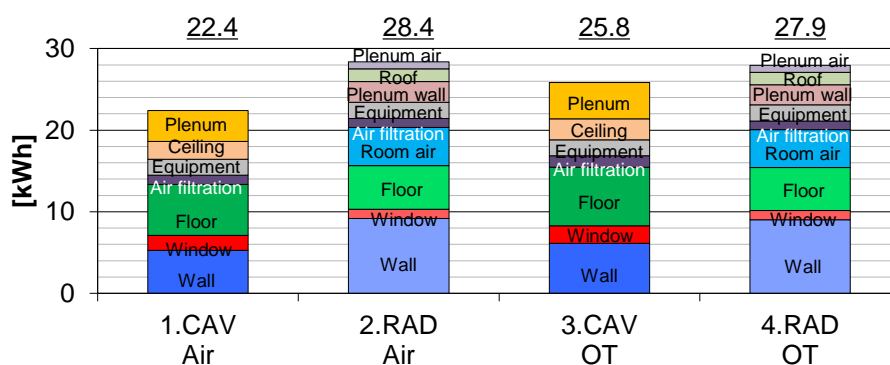


Fig. 6.4.3 熱流の内訳の比較 (No. 1~4)

6.4.2 熱容量の違い

① 時系列変化について

Fig. 6.4.4 に対流方式, Fig. 6.4.5 に放射方式での熱容量の大小の比較を示す。対流方式, 放射方式共に立ち上がりの負荷が熱容量を小さくすると大きくなっている。空調停止後の温度変化に着目すると, No.6 (放射方式の熱容量大) において温度上昇が 1.0 °C 以下に抑えられているが, その他のパターンにおいては温度上昇が 2.0 °C 程度となっている。空調時間帯に放射パネルにより冷却された壁体に蓄熱されていたためこのようになったと考えられ, 立ち上がりの温熱環境の観点では熱容量の大きな建物とすることは天井放射空調において有効であることが示されている。

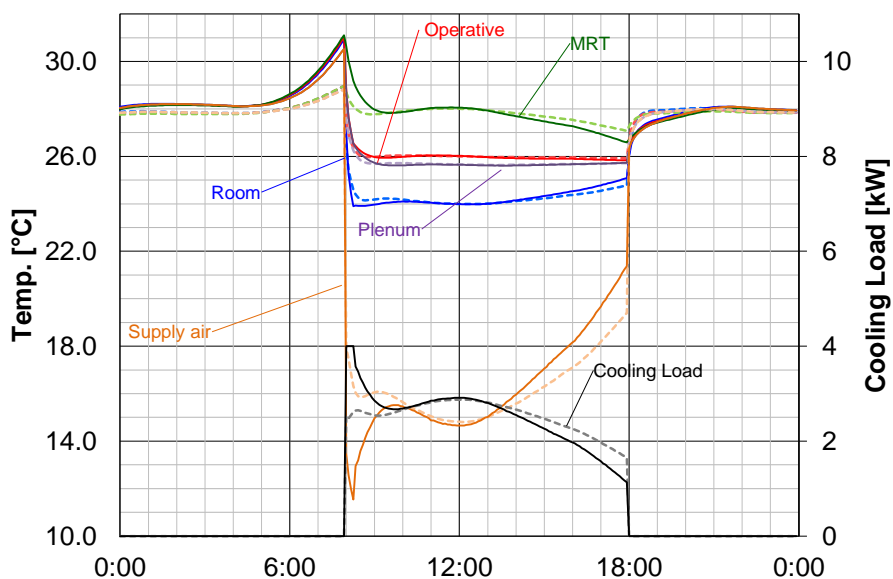


Fig. 6.4.4 熱容量の大小の比較 (対流空調, 実線 : 小, 点線 : 大)

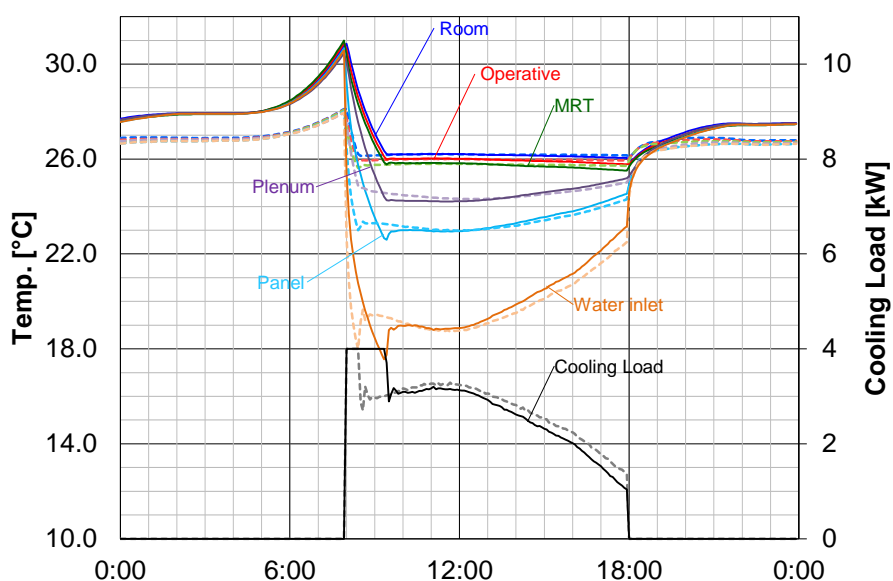


Fig. 6.4.5 熱容量の大小の比較 (放射空調, 実線 : 小, 点線 : 大)

② 熱流の内訳の比較

建物の熱容量を小さくすると立ち上りの負荷が大きくなる傾向はあるが、日積算の負荷を比較すると対流方式と放射方式ともに、熱容量が小さい方が小さくなっている。また、熱容量の大小にかかわらず、放射方式の熱流の合計値（負荷）が対流方式と比べて大きくなっている（Fig. 6.4.6）。

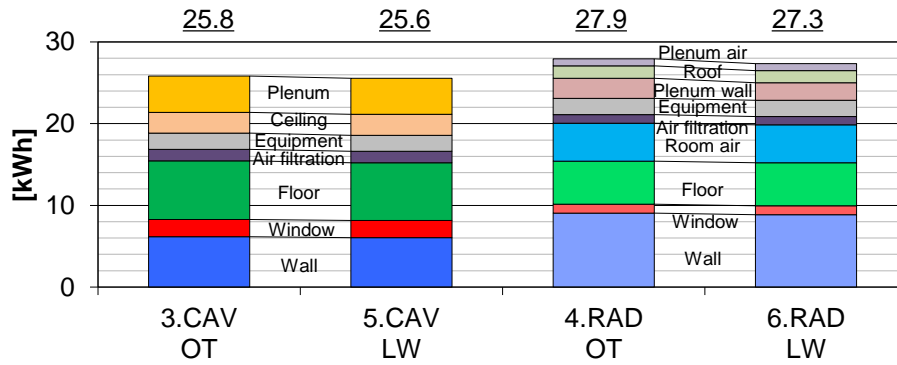


Fig. 6.4.6 熱流の内訳の比較 (No. 3, 5, 4, 6)

6.4.3 断熱性の違い

Fig. 6.4.7 に対流方式, Fig. 6.4.8 に放射方式での断熱性能の高低の比較を示す。対流方式, 放射方式共に断熱性能を高めると負荷が小さくなることを示されている。断熱強化による負荷の削減効果は空調方式による顕著な差は見られない。

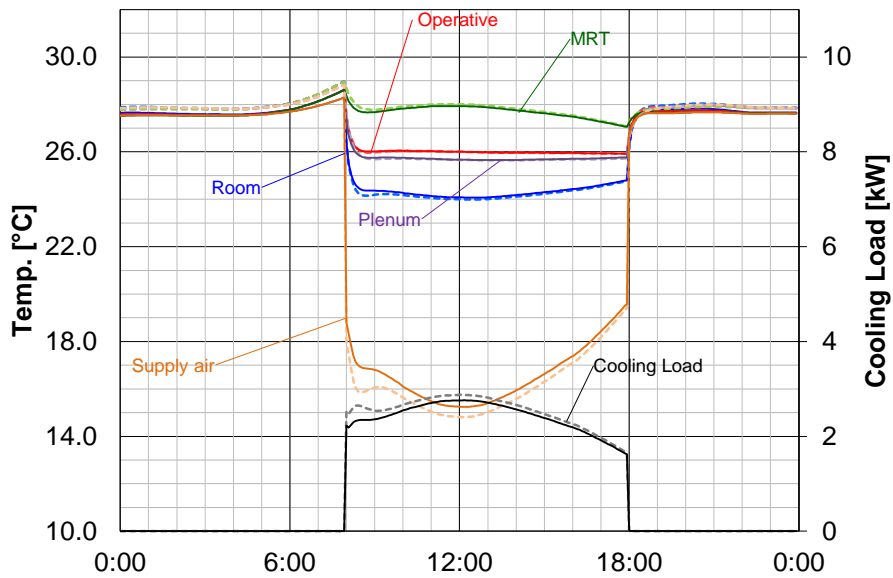


Fig. 6.4.7 断熱性能の高低の比較 (対流空調, 実線:高, 点線:普通)

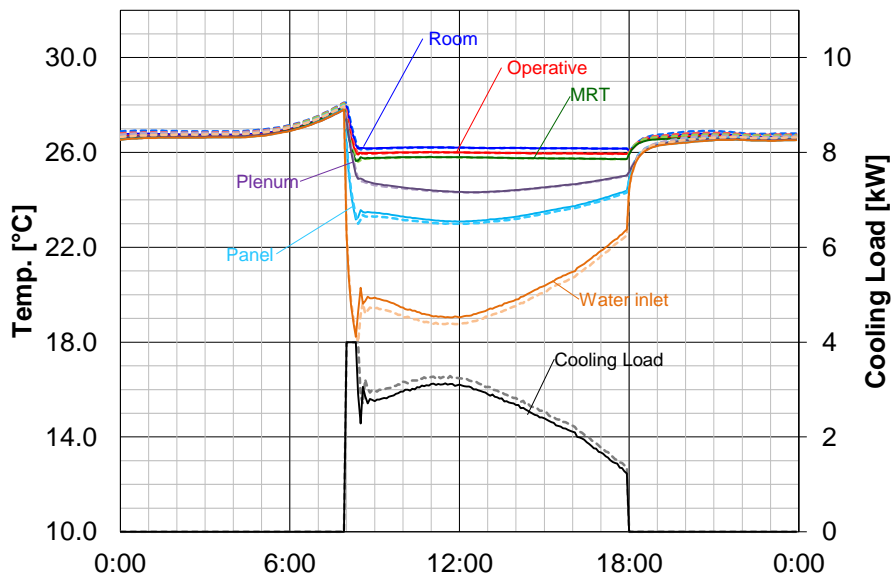


Fig. 6.4.8 断熱性能の高低の比較 (放射空調, 実線:高, 点線:普通)

第6章 天井放射パネル空調の熱負荷計算手法の提案と熱負荷特性の把握

Fig. 6.4.9 に断熱性能の高低での熱流の内訳の比較を示す。他のシミュレーションパターンと同様に建築仕様が同一条件において対流方式よりも放射方式において、熱流の合計値（負荷）が大きい。

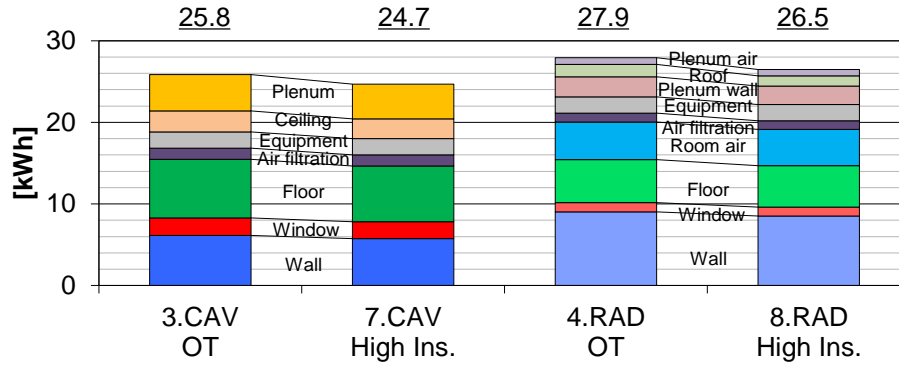


Fig. 6.4.9 熱流の内訳の比較 (No. 3, 7, 4, 8)

6.4.4 日射遮蔽性の違い

Fig. 6.4.10 に対流方式, Fig. 6.4.11 に放射方式での日除けの有無の比較を示す。対流方式, 放射方式共に日射遮蔽性能を高めると負荷が小さくなることが示されている。日射遮蔽による負荷の削減効果は空調方式による顕著な差は見られない。

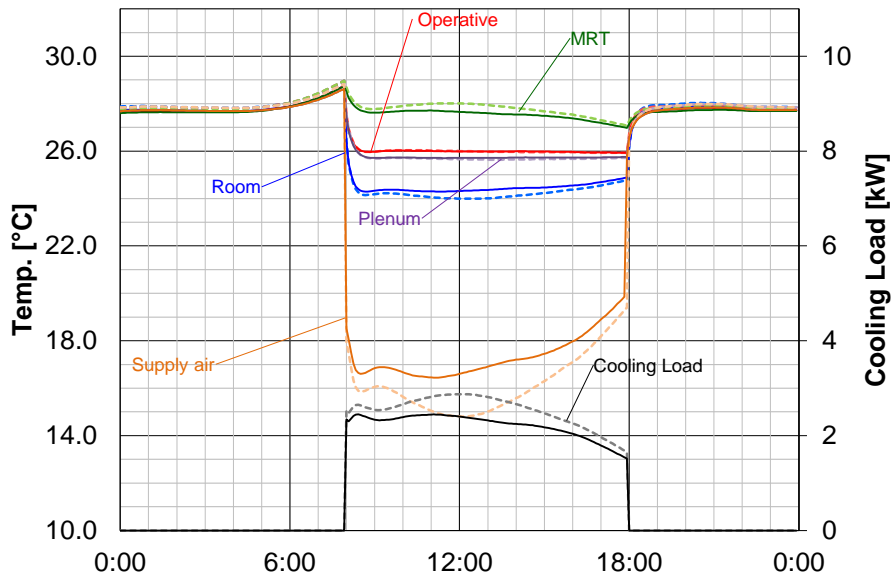


Fig. 6.4.10 日除けの有無の比較 (対流空調, 実線:有, 点線:無)

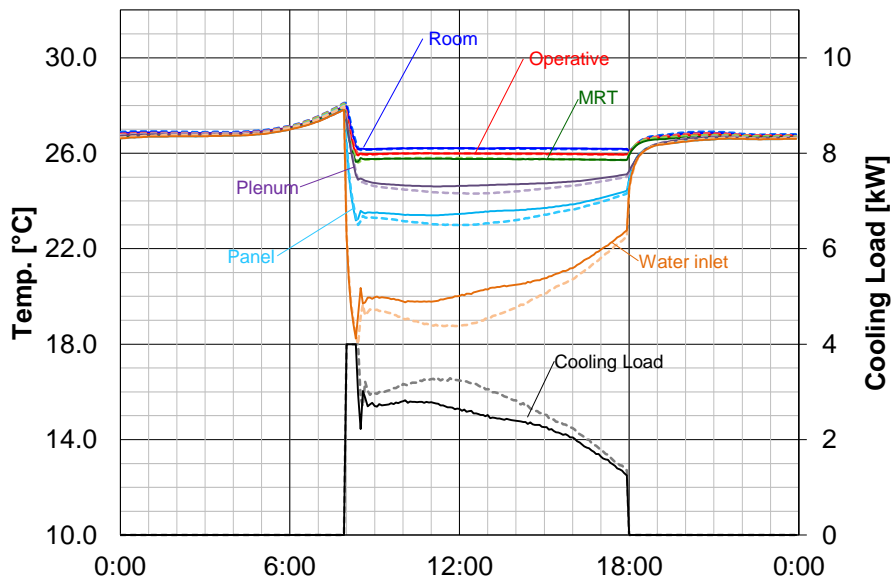


Fig. 6.4.11 日除けの有無の比較 (放射空調, 実線:有, 点線:無)

第6章 天井放射パネル空調の熱負荷計算手法の提案と熱負荷特性の把握

Fig. 6.4.12 に日除けの有無での熱流の内訳の比較を示す。他のシミュレーションパターンと同様に建築仕様が同一条件において対流方式よりも放射方式において、熱流の合計値（負荷）が大きい。

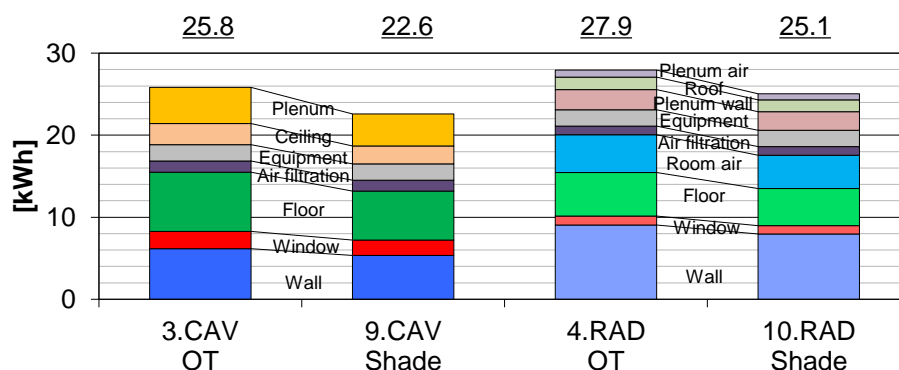


Fig. 6.4.12 熱流の内訳の比較 (No. 3, 9, 4, 10)

6.5 まとめ

本章において、天井放射パネル空調熱収支モデルを応用し、天井放射空調に即した熱負荷計算手法を提案した。これにより、天井裏の冷却の効果の考慮が可能であることを示した。さらに、天井放射空調の熱負荷に建築仕様が及ぼす影響に関して考察を行い、下記の知見を得た。

- ・ 天井裏を冷却する効果が大きいため、一般対流空調よりも熱負荷が大きくなることを示し、天井裏の影響を考慮することの重要性を示した。
- ・ 熱容量を大きくすることが放射空調の立ち上がりの負荷削減や非空調時の温度上昇の抑制に効果があることを示した。

変数定義

- n : 未知数の温度の総節点数
- n_0 : 既知数の温度（外気温など）の総節点数
- $m_{i,j}$: i 番節点に関する拡張熱容量
- $c_{i,j}$: j から i 番節点への拡張熱コンダクタンス
- x_j : j 番節点の温度
- $r_{i,j}$: j 番発熱源から i 節点への自由入力係数（面積など）
- x_j : j 番発熱源の発熱量（日射量など）
- \mathbf{x} : 温度状態ベクトル(n)
- \mathbf{x}_0 : 規定温度入力ベクトル(n_0)
- \mathbf{g} : 発熱ベクトル(n_0)
- M : 熱容量マトリクス($n \times n$)
- C : 熱コンダクタンスマトリクス($n \times n$)
- C_0 : 規定温度入力マトリクス($n \times n_0$)
- R : 自由入力マトリクス($n \times n_0$)

参考文献

- 1) 「建築設備設計基準 平成 27 年版」, 国土交通省大臣官房官庁営繕部・環境課監修
- 2) ASHRAE: ASHRAE Handbook HVAC Systems and Equipment SI edition, Ch. 6 Panel Heating and Cooling
- 3) Jingjuan (Dove) Feng, Fred Bauman, Stefano Schiavon, Experimental comparison of zone cooling load between radiant and air systems, Energy and Buildings, Volume 84, pp 152-159, 2014
- 4) Jingjuan (Dove) Feng, Stefano Schiavon, Fred Bauman, Cooling load differences between radiant and air systems, Energy and Buildings, Volume 65, pp. 310-321, 2013
- 5) H. Okuyama, Thermal and airflow network simulation program NETS, Proceedings of the 6th International IBPSA Conference (Building Simulation '99), Kyoto, Japan, pp. 1237-44, 1999
- 6) 川島実, 奥山博康, 小林昌弘: 熱回路網法による汎用熱移動計算プログラムの開発と検証, 清水建設研究報告, Vol. 52, pp. 65-72, 1991.10
- 7) ASHRAE Standard 140-2011, Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs. Atlanta, GA: ASHRAE, 2011.

第7章 設計手法の提案と省エネルギー性能の評価

第7章 設計手法の提案と省エネルギー性能の評価

7.1 既往研究の課題と本章の位置づけ

7.1.1 既往研究の課題

天井放射パネル空調の設計を行う際の様々な指針が示されている。例えば、国土交通省の監修の「建築設備設計基準」¹⁾においては、以下のような天井放射パネル空調システムの設備仕様を決定するフローを示している。

- ① 熱負荷計算結果から天井放射パネルの仕様を仮に決定
- ② 仮に決定した仕様に基づき温熱環境が基準の範囲内 ($-0.5 \leq \text{PMV} \leq 0.5$) にあるかどうかを確認
- ③ 範囲内になれば天井放射パネルの仕様の見直しを行う。
- ④ 範囲内にあれば、天井放射パネルの仕様を決定

ただし、熱負荷計算方法については、既存の一般空調システムを前提とした負荷計算方法が前提となっている。また、天井放射パネルが処理する負荷は、熱負荷計算より得られた熱負荷から、外気処理システムから供給される空気が処理する顕熱量を差し引いた負荷としている。

ASHRAE Handbook²⁾や ISO 18566-3³⁾においても、同様に天井放射パネル空調システムの設備仕様を決定するフローを下記のように定めている。

- ① 室内温熱環境条件の設定
- ② 顕熱負荷及び潜熱負荷の計算
- ③ 供給外気条件の決定
- ④ 供給外気による処理潜熱量の確認
- ⑤ 供給外気による処理顕熱量の確認
- ⑥ ②の顕熱負荷から⑤の処理顕熱量を差し引き、天井放射パネルの処理すべき顕熱負荷を決定
- ⑦ パネル表面温度が結露しないかを確認
- ⑧ パネル以外の壁面と床面の表面温度の決定
- ⑨ パネルの設置面積の決定
- ⑩ 送水温度の決定

ここでも負荷の計算方法については、天井放射パネル空調に即した負荷計算方法は定められていない。

このように、いずれも天井放射パネル空調に即した熱負荷計算方法が明示されていない。既存の指針に従って設計を行う場合、既存の熱負荷計算方法を利用して天井放射パネルの設備仕様を決定することになる。Feng らによれば、負荷計算手法により天井放射パネル空調の負荷計算結果が異なることが示されている⁴⁾。既往の研究でも明らかなように、負荷計算手法の選定を誤ると適正な設備容量で設計が行えない可能性があり、設計指針の中に天井放射パネル空調に即した熱負荷計算を明確に定義する必要がある。

本論文の2章において、天井放射パネルの敷設条件が天井放射パネルの処理熱量に大きく影響を与えることが示されている。また、6章において天井放射パネル空調熱収支モデルをベースとして、天井放射パネル空調の熱負荷計算を熱回路網モデルにて実施し、天井放射パネル空調と一般的な対流空調との負荷特性の違い、熱負荷に対して建築仕様の及ぼす影響について考察を行った。これにより天井裏の影響により、対流空調よりも負荷が大きくなることが分かっ

た。このように、天井放射パネルの冷却能力の算定や熱負荷の計算を行う際には、天井放射パネルの敷設条件や天井裏の考慮が重要である。このことから、熱負荷計算を行う段階、つまり、設備仕様を決定する設計の初期段階から、天井放射パネルの設置条件を考慮に入れることが必要であることが示唆される。一方で、上記の設計フローにおいては、熱負荷計算は天井放射パネルの設備仕様の決定と別個に行うことが前提となっており、天井放射パネルの設置条件を考慮に入れておらず、適正な設計を行う際には不十分であると考えられる。

天井放射パネル空調の省エネルギー性能の評価方法に関しては、設計したシステムを目標とする省エネルギー性能を満たすかどうかを判断するために必須である。これに関する研究は国内、海外で多く行われている。

国内においては、鈴木らは、実測結果と放射冷暖房評価モデルの計算値の比較を実施している⁵⁾。しかし、外気処理システムとの併用による検討は行われていない。さらに省エネルギー性能に関する分析がなされていない。

久保木らは、対流式空調と天井放射パネル空調の熱源エネルギー消費量の比較を実施している。天井放射パネル空調に関しては、天井放射パネルの表面温度・パネルの敷設率・補助空調機の負荷配分比をパラメータとして、検討を行っている⁶⁾。しかし、負荷計算に関してはBESTを用いた計算によるものであり、天井放射パネル空調に即した負荷計算となっていない。

塩谷らは、天井放射パネル空調をBESTに組込むための方法を示している⁷⁾。外気処理システムとの組合せの検討などは行われていない。また、外気処理システムとの組合せを検討する際の設計手法に関する提案は行われていない。また、上記論文の手法を用いて、放射パネルの運用方法に関する検討を行っている⁸⁾。外気処理システムは天井埋込形空冷PACと顕熱交換器を組み合わせたシステムを想定している。結露や快適性に関する検討がなされているが、省エネルギー性能に関する検討が行われていない。

松本らは、シミュレーションを用いた設計フローを提案しており、外気処理システムを含めた総合的な設計が行えるような方法を提案している⁹⁾。ただし、設計仕様を決定する際の最大熱負荷に関しては建築設備設計基準¹⁾に基づいており、敷設条件を考慮した負荷計算を用いていない。

海外においては、Bojicらは、EnergyPlusを用いて、放射面の位置による各種放射空調方式の省エネルギー性能の比較を行っている¹⁰⁾。ただし、外気処理システムとの組合せによる比較は行われていない。

SodecらはTRNSYSにより、VAVシステムと天井放射空調システムとのランニングコストの比較を行っている¹¹⁾。外気処理システムとの組合せによる評価を行っているが、空調負荷に関してはVAVシステムと天井放射空調システムの負荷が等しいと仮定している。

Bourdakisらは、ASHRAE Standard 140¹²⁾の建築モデルを用いて、躯体蓄熱式放射空調システム(Thermo Active Building System: TABS)と天井放射パネル空調システムに関して、放射空調で賄う負荷と空気搬送システムが賄う負荷の比率をパラメータとして、設備仕様の比較を行っている¹³⁾。ただし、基礎的な検討にとどまり、設計フローの提案には至っていない。

このように、省エネルギー性能を評価する手法は多くの研究で行われている。

第7章 設計手法の提案と省エネルギー性能の評価

各研究での着眼点は以下ようになる。

- ① 外気処理システムをどのような組み合わせるか
- ② 一般空調システムとの比較
- ③ 天井放射パネル空調に即した熱負荷計算手法を採用しているか
- ④ どのように設計を行うか

天井放射パネル空調システムにおいても、一般空調システムと同様に、居室の空気質を保つために、外気を供給しなければならないことから、空気搬送を伴う外気供給システムは必須であり、①に関しては、省エネルギーの評価を行う際に必要な検討項目である。②～④に関しては、前述の通りである。これらの着眼点を網羅的に検討した例は少ない。

7.1.2 本章の位置づけ

上記の既往研究の課題と本論文で示してきた知見を鑑み、下記を行う。

① 天井放射パネル空調の熱負荷特性を踏まえた設計フローの提案

天井裏の影響、パネルの種類、パネルの設置条件から天井放射パネル空調システムを適正な設備仕様で設計できるフローの提案を行う。ここで天井放射パネル空調に即した負荷計算方法を設計に組み込むことを試みる。さらに、外気処理システムを含めた空調システム設計のフローとする。

② 上記設計フローの試行

提案した設計フローを実際に単純な建築モデルを対象とした試行を行い、設計フローの有用性について示す。従来の設計フローについても試行し、どのように設備仕様の違いが生起するかを検討する。

③ 省エネルギー評価のための手法の提案とケーススタディ

提案した設計フローから設計したシステムの省エネルギー性能の評価を行い、省エネルギー性能を確保するための天井放射パネルの敷設条件（敷設率）、設計の在り方を明確化する。省エネルギー計算を行う際には、空調の2次側の負荷の算出方法が肝要となる。6章で示した手法に外気処理システムを含めた熱回路網モデルの構築方法を示す。

7.2 天井放射空調システム設計フロー

7.2.1 設計フローの提案

Fig.7.2.1 に本研究で提案する天井放射パネル空調システムの設備設計のフローを示す。設計フローは以下の3つの手順に分かれる。

① 設計と条件の設定

ここでは、建築条件、パネル敷設条件、室内温熱条件、外気条件、人員条件を設定する。建築条件からは、外壁や窓の材料構成・気密性、照明負荷密度、機器発熱密度などから、熱負荷計算に必要な情報が得られる。室内温熱条件は既存の居住者の快適性を担保するための基準（ASHRAE Standard 55-2017¹⁴⁾など）を参考に設定される。外気条件は計画建物の地域から決定される。人員条件は、計画建物の用途などをもとに決定される。人体発熱など熱負荷計算に必要な情報や必要外気量の設計に必要な情報である。パネル敷設条件は、意匠設計者と設備設計者と協議の上、決められる。ここでは、天井放射パネルの設置面積や設置条件（天井材の有無、天井の開口条件）が想定される。これらの設計と条件は、省エネルギー性能やコストなどから、試行錯誤しながら決定される条件となる。

② 各機器の処理負荷などの設備仕様の決定

ここでは、天井放射空調と外気処理システムに関する設備仕様を決定する。まず、天井放射空調に関しては、設計と条件を入力として「天井放射空調設備仕様決定フロー」を経て、室内の顕熱負荷処理のための設備仕様が決まる。放射パネルに関しては、送水温度、パネル負荷、流量、パネル面積、選定したパネル種類である。また、放射パネルのほかに空調機による負荷処理が必要な場合は、空調機負荷（顕熱）が決定される。

一方、外気条件、人員条件、室内温熱条件から一般的に行われる空調機の設計方法（空気線図による空調方式検討）により、外気処理システムの検討を行う。この検討結果から、所定の温湿度条件に調整されて居室に供給される外気（以下、供給外気）が処理する居室の顕熱量（以下、供給外気処理顕熱量）を算出し、「天井放射空調設備仕様決定」で決定された「空調機負荷（顕熱）」と比較し、供給外気がどの程度、居室の顕熱負荷の処理に寄与するかの確認を行う。その際、もし供給外気処理顕熱量が空調機負荷（顕熱）よりも過度に大きいときには、供給外気が室内顕熱の処理に大きく寄与することになる。この場合、想定よりも放射パネルが処理する負荷が小さくなることになり、パネル敷設条件や外気処理システムの再検討が必要となる。

③ 機器選定と各機器の接続方法・ルート決定

②を経て、放射パネルや外気処理システムの負荷、送水温度や給気温度などの設備仕様を決定したあと、機器の選定のための設計を行う。この設計に関しては既存の方法に準拠する¹⁾。

第7章 設計手法の提案と省エネルギー性能の評価

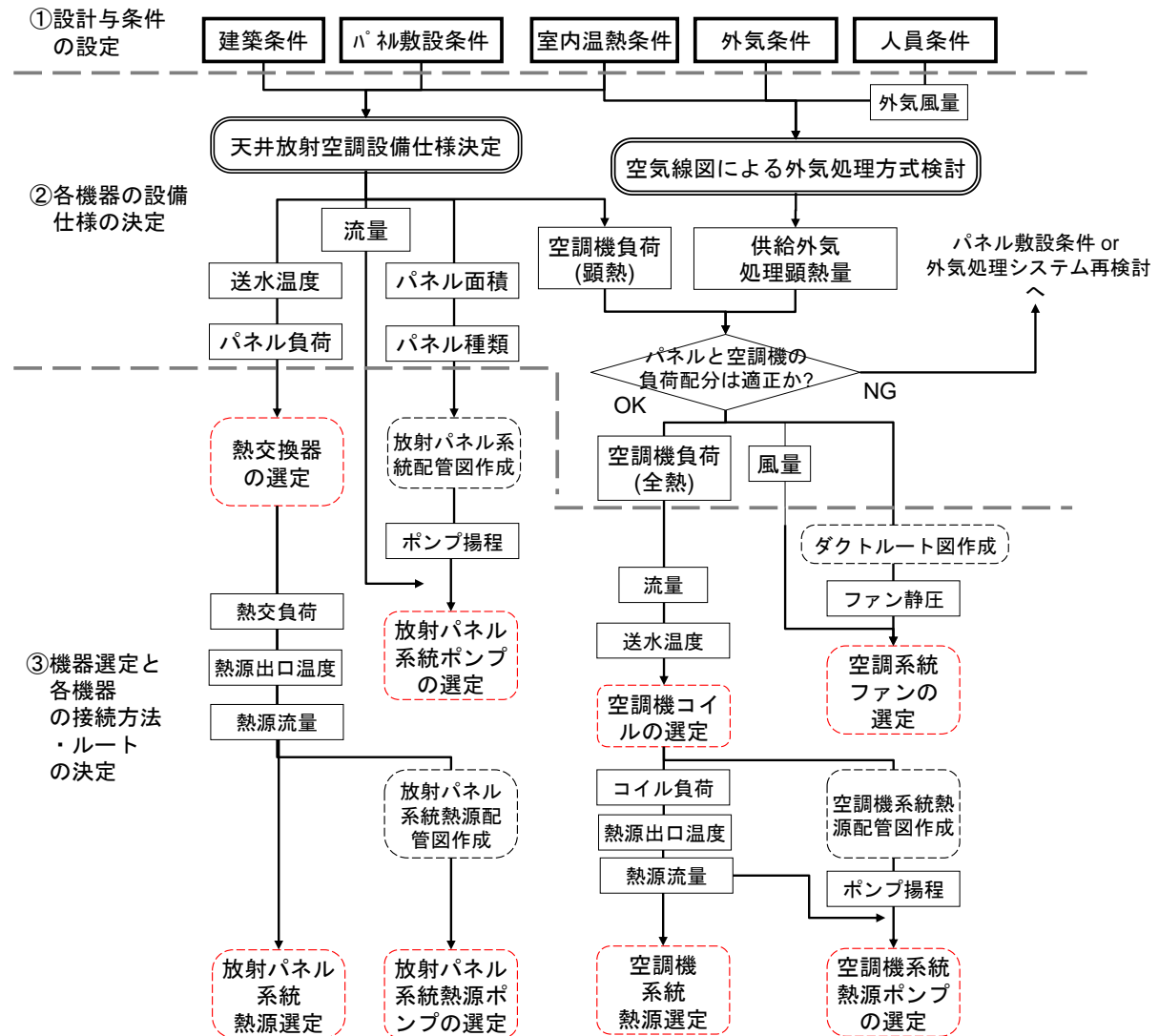


Fig. 7.2.1 設計フロー

7.2.2 天井放射空調設計仕様決定フロー

従来では以下のようなフローで天井放射空調の設備仕様を決定することが多い（以下、従来フロー）。

- ① パネル設置面積を決定する。
- ② EN14240¹⁵⁾で規定されたパネルの能力線図からパネル能力・仕様を決定してパネルの処理する熱負荷（以下、パネル負荷）を算出する。
- ③ 建築条件を入力して行った熱負荷計算により求められた居室の熱負荷からこのパネル負荷を差し引いて補助顕熱処理設備（空調機（AHU）やファンコイルユニット（FCU））の処理する熱負荷（以下、空調機負荷）を算出する。
- ④ 算出された熱負荷から機器選定

この手順をフロー図にしたのが Fig. 7.2.2 である。これに対し、本論文で提案する設備仕様決定フロー（以下、天井放射空調設計仕様決定フロー）は、以下のような手順となる。

- ① 各種設計と条件（建築条件・天井放射パネルの敷設条件・室内温熱環境条件（居室空気温度・作用温度））を設定する。
- ② 目標室内温熱環境とパネル設置面積からパネル表面温度の設定値を決定する。
- ③ 室温とパネル表面温度を設定して熱負荷計算を実施する。
- ④ 熱負荷計算内で目標とする温熱環境が満足しているかどうかを確認する。満足していなければ、②で決定したパネル表面温度の設定値を再度見直して、③を行う。満足していれば、⑤を行う。
- ⑤ 熱負荷計算から算出されたパネル負荷・居室負荷率から5章で示した天井放射パネル空調性能予測手法を用いて、所定の流量におけるパネルの冷水入口温度を確認する。パネルの冷水入口温度が室内の露点温度よりも低ければ、①で決定した居室空気温度の設定値を再度見直して、②③④を行う。冷水入口温度が露点温度よりも高ければ、結露の発生はないこととなり、パネル負荷と冷水入口温度、流量が決まり、天井放射パネルの仕様が決定される。
- ⑥ 熱負荷計算から算出された空調機負荷は補助顕熱処理設備が処理するべき熱負荷として、外気処理システムの設備仕様検討フローの中での判断基準となる。

この手順をフロー図にしたのが Fig. 7.2.3 である。天井放射空調設計仕様決定フローには、天井放射パネルの敷設条件による天井裏の影響やパネル表面温度を考慮した熱負荷計算をした上で、パネル仕様を決定するという特徴がある。天井放射空調設計仕様決定フローの利点としては、決定したパネル仕様を設置した場合、居室環境が目標（作用温度）通り制御されることを担保できること、パネルの処理熱量の内訳（居室側熱負荷と天井側熱負荷）が計算できることが挙げられる。また、パネル負荷と同時に空調機負荷も同時に計算可能であり、補助顕熱処理設備の仕様を適正に決定することが可能であると考えられる。

天井放射空調設計仕様決定フローの熱負荷計算は6章で示した熱回路網プログラム¹⁶⁾を用いることを前提としている。まず対象建物の熱回路網モデルを作

第7章 設計手法の提案と省エネルギー性能の評価

成し, モデルの節点の熱容量や熱コンダクタンスなどのパラメータを入力する。室温とパネルの居室側表面温度(≒天井裏側表面温度)を設定する温度で制御し, 気象データや発熱量, 計算間隔といった条件を定義した上で計算を実行する。

設備仕様の計算には天井放射パネル空調性能予測手法を用いる。室温とパネル居室側表面温度, 送水流量, パネル居室側負荷率(パネル居室側負荷/パネル全負荷)を入力条件とし送水温度を算出する。

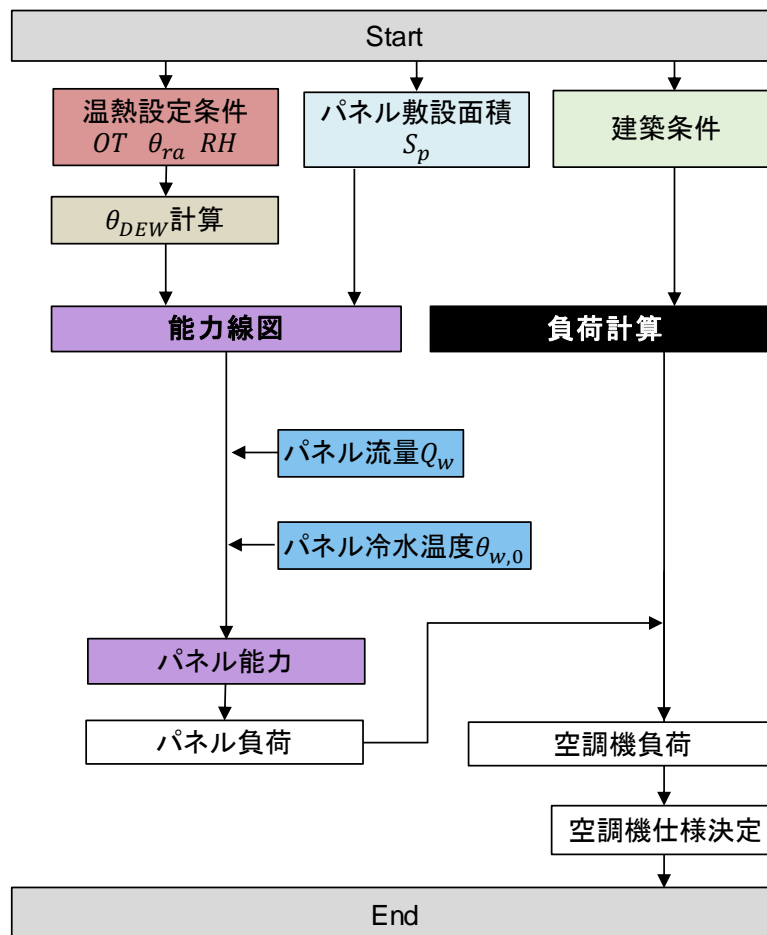


Fig. 7.2.2 天井放射パネル空調設備仕様決定ための従来フロー

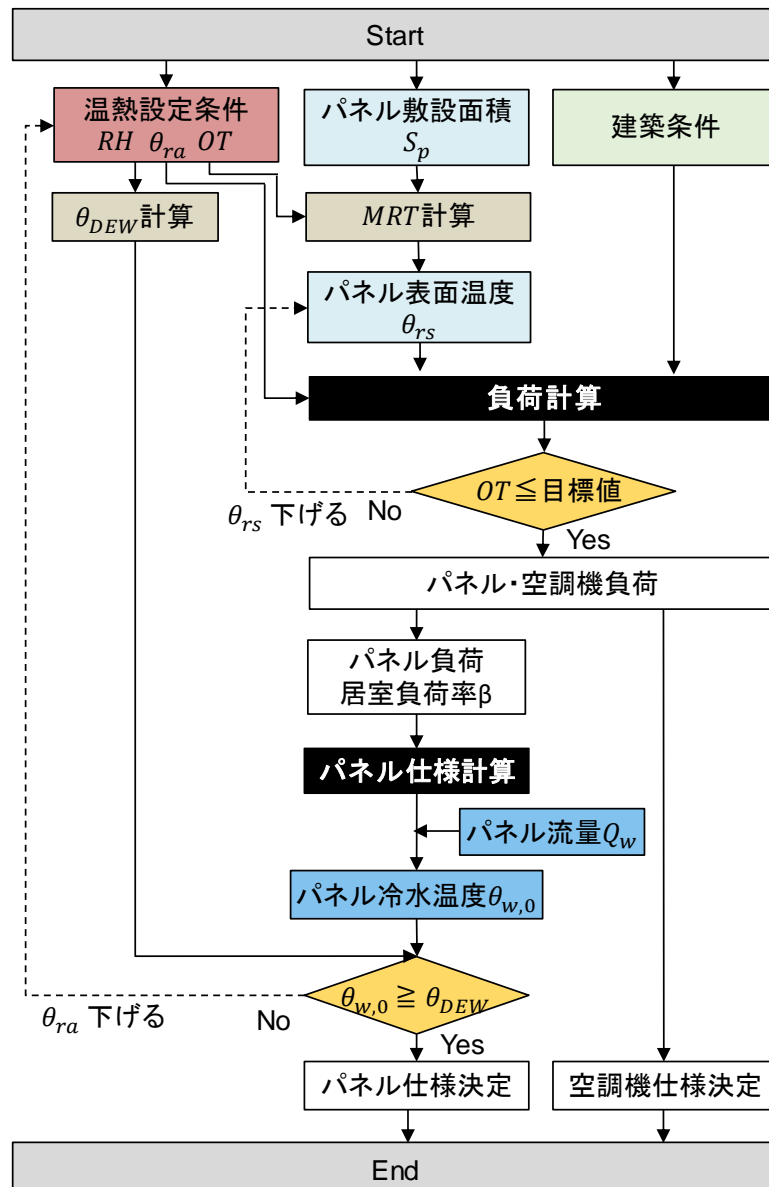


Fig. 7.2.2 天井放射パネル空調設備仕様決定フロー

7.2.3 外気調和システムの選定方法

外気処理システムの選定に関しては、既存の空気線図による検討方法などが、示されており、これに準ずる。ある所定の外気処理システムを選定した際に、除湿処理された外気の空気の状態により、算出された顕熱処理量（供給外気処理顕熱量）を算出する。下記に算出式を示す。

$$q_{s,OHU} = \rho_a c_a Q_a (\theta_{ra} - \theta_{sa}) \dots\dots\dots (7-1)$$

ここから算出された供給外気処理顕熱量と天井放射空調設備仕様決定フローから算出された空調機負荷（顕熱）の大小を比較して、補助顕熱処理設備の要・不要を判断する。Fig. 7.2.4 に判断のフローを示す。

補助顕熱処理設備としては、以下が考えられる。

① 空調機方式

Fig. 7.2.5 の例は、外気処理空調機により調湿された外気を空調機に送り、居室からの還気と混合させ、天井放射パネルで処理できない負荷を冷却コイルにより除去する方式である。

② ファンコイルユニット方式

負荷の大きなペリメータにファンコイルユニットを設置して、天井放射パネルにより処理できない負荷を除去する方式である。

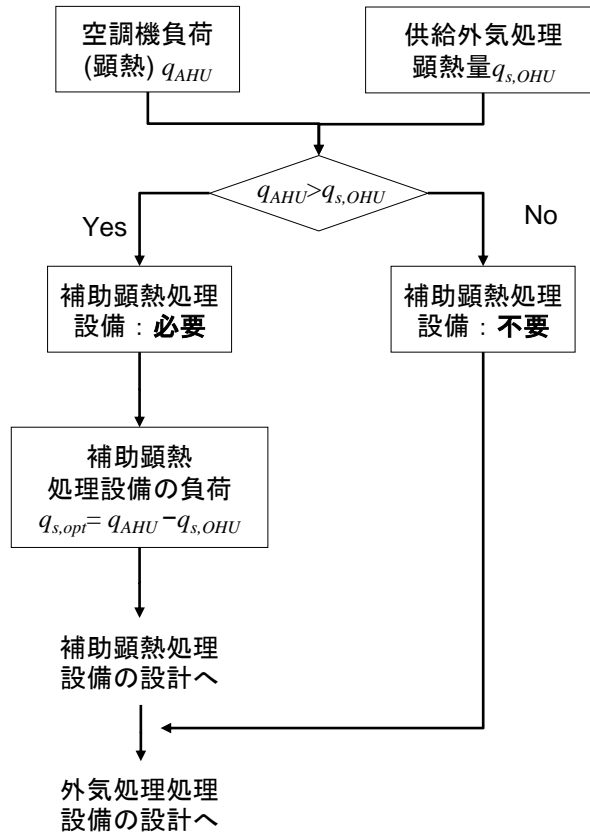


Fig. 7.2.4 補助顕熱処理設備の有無の判断フロー

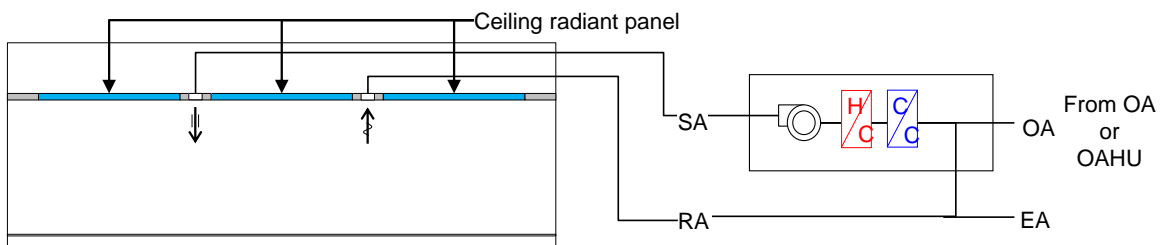


Fig. 7.2.5 補助顕熱処理設備の例 空調機方式

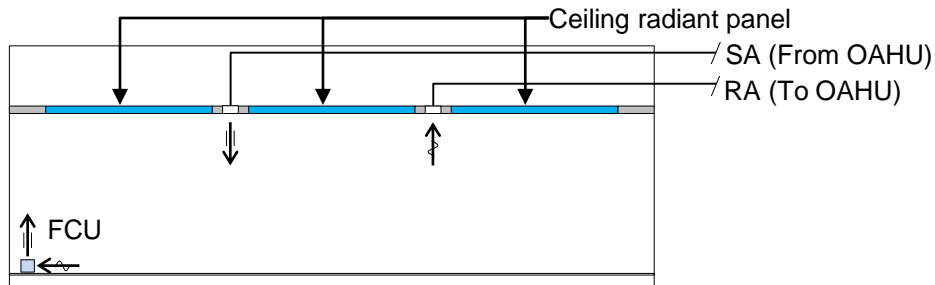


Fig. 7.2.6 補助顕熱処理設備 ファンコイルユニット方式

7.3 提案設計フローの試行

本節では、前節で示した提案設計フローの試行を行い、従来フローとの違いを明らかにし、その有用性を示す。

7.3.1 設計と条件の設定およびケーススタディパターン

対象とする建物の外観を Fig. 7.3.1 に示す。ASHRAE standard 140¹⁷⁾の熱負荷計算テストに提示される case900 の建物モデルにパネルを設置し、居室空間と天井裏空間に分けたものとし、6章のケーススタディで用いた建物モデルと同様のものを用いた。また、気象条件も同様に拡張アメダス気象データ(1991-2000)¹⁸⁾を使用し地域を東京とした。シミュレーション期間は7/1~7/31とし、空調の運転時間は8:00~18:00とした。天井放射パネルの敷設の条件は Fig. 7.3.2, 7.3.4, 7.3.5 のように天井放射パネルの敷設率をそれぞれ80%, 60%, 40%とした。

室内設定条件に関しては、ASHRAE Standard 55-2017¹⁴⁾を参考に下記に示す条件とした。

- ・ 作用温度: 27.0°C
- ・ 相対湿度: 45% (あるいは、絶対湿度:0.006 kg/kg(DA))

なお、作用温度 (以下、OT) は下式にて定義される。

$$OT = (\theta_m + MRT) / 2 \dots\dots\dots (7-2)$$

室内の発熱条件に関しては下記の条件とした。

- ・ 照明発熱 : 200 W (4.2 W/m²)
- ・ 機器発熱 : 600 W (12.5 W/m²)

人員条件およびこれに伴い決定される必要外気量に関しては、下記の条件とした。

- ・ 人員条件 : 0.2 人/m²
- ・ 必要外気量 : 200 m³/h (≒ 48[m²] × 0.2[人/m²] × 20[m³/h・人])
- ・ 人体潜熱発生負荷 : 680 W (≒ 68^{*}[W/人] × 48[m²] × 0.2[人/m²])
- ※ 27.0 °C, 代謝量 1.2 Met での人体潜熱発生量

外気処理システムを設計する際の外気条件に関しては、下記の条件とした。

- ・ 乾球温度 : 34.0°C
- ・ 相対湿度 : 50%

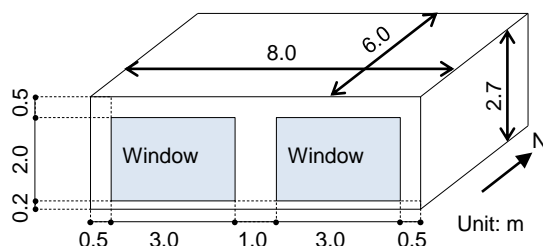


Fig. 7.3.1 建物モデル

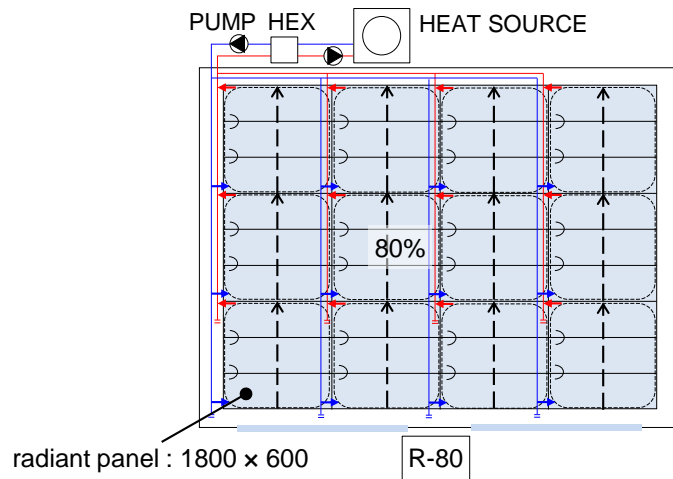


Fig. 7.3.2 天井放射パネル敷設率 80%のパターン(R80)

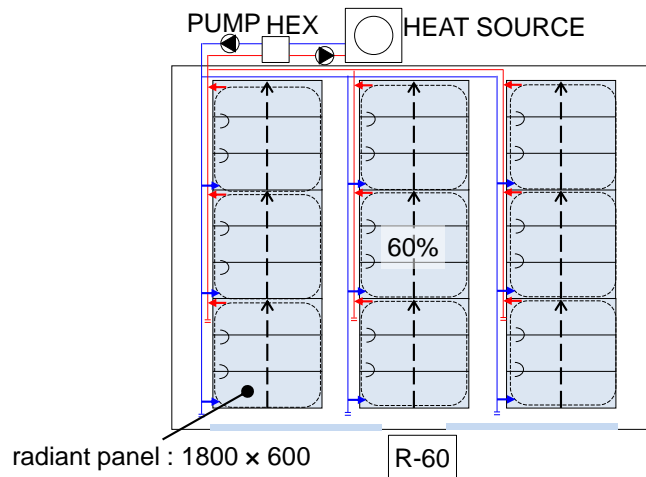


Fig. 7.3.3 天井放射パネル敷設率 60%のパターン(R60)

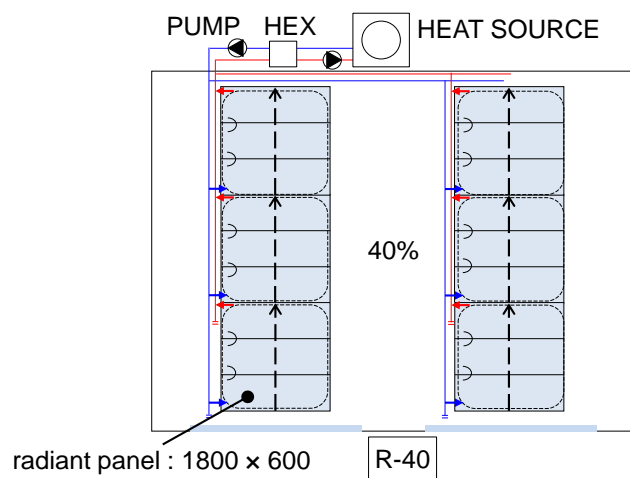


Fig. 7.3.4 天井放射パネル敷設率 40%のパターン(R40)

7.3.2 天井放射空調設備仕様決定フローの試行

(1) 熱負荷計算方法

天井放射空調設備仕様決定フローの試行で用いた熱回路網モデルを Fig. 7.3.5 に示す。第6章に示した熱負荷計算のためのモデル化方法に準拠してモデルを構築した。ただし、天井放射パネルに関しては、冷水とパネル表面の熱収支を解くモデルは組み込まず、居室側及び天井裏側のパネル表面温度の節点と居室空間、天井裏空間の熱伝達を考慮するのみとしている。これは、天井放射パネルの種類はパネル仕様計算の時に確認するため、ここでは設定しない。

パネルの敷設率の条件に合わせて、パネル表面と空間の間の放射熱伝達コンダクタンスや対流熱伝達コンダクタンス、パネル以外の天井材の熱伝導コンダクタンスを変更した。

負荷計算を行う際には、天井放射パネルの表面温度 (θ_{rs} と θ_{ps})、居室の空気温度 (θ_{ra}) に、各節点が設定値となったときの熱流を計算し、各熱流と節点に与える発熱量（以下、制御発熱とする）がバランスするような、制御発熱を算出する。算出された天井放射パネルの居室側表面、天井裏側表面及び居室空気での制御発熱を、それぞれパネル居室側負荷、パネル天井裏側負荷及び空調機負荷とする。

なお、Fig. 7.2.2 に示した従来フローにおける負荷計算もここで示した熱回路網モデルを用いて行う。ただし、天井放射パネル表面での負荷計算は行わず、居室空気 (θ_{ra}) での負荷計算を行った。従来方法において、建築設備設計基準における最大負荷計算や BEST をはじめとする応答係数法による熱負荷計算を用いることも考えられるが、熱負荷計算手法間での違いなども含まれた比較となる。ここでは簡単のため、このような想定とした。

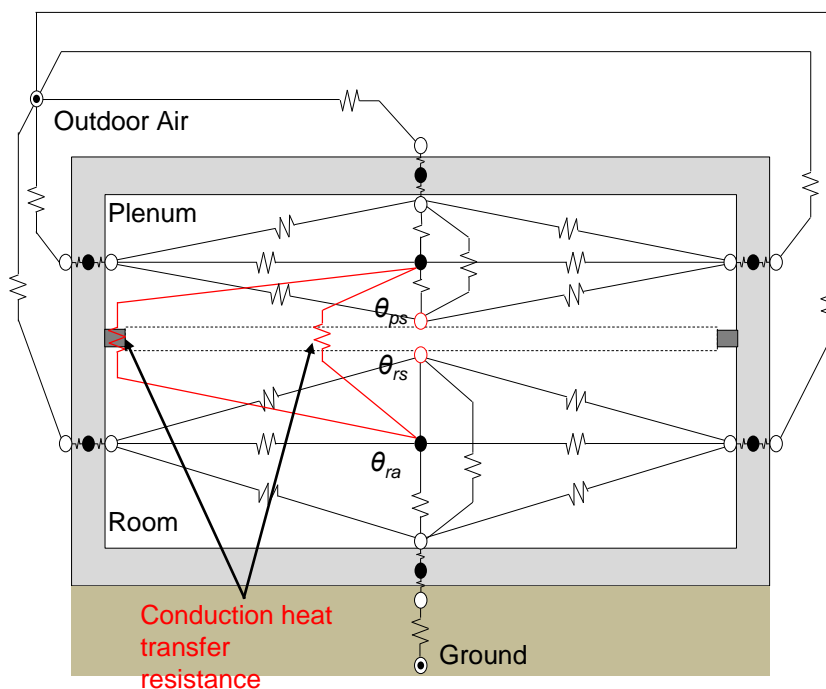


Fig. 7.3.5 熱負荷計算のための熱回路網モデル

(2) 天井放射パネル仕様計算方法

天井放射パネルの仕様計算方法については、第5章で示した「天井放射パネル性能予測手法」における5.2.2項の「(2)-2 負荷と室内環境条件（作用温度）から冷水入口温度を求める」を用いる。また、ここで示すフローの試行では「天井放射パネル放熱特性検証基礎実験」で用いた天井放射パネル（Fig. 4.3.2）を想定し、パネルの種類などの選定の検討は行わないものとする。以下に想定する天井放射パネルと敷設の条件（3枚連結）でのパネル熱収支連立方程式を示す。ここでは想定する流量での冷水入口温度を求めることになる。

$$\begin{pmatrix} A & B & C & C & C & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ B & A' & 0 & 0 & 0 & D & D & D & 0 & 0 & 0 \\ C & 0 & E & 0 & 0 & F & 0 & 0 & G & G & 0 \\ C & 0 & 0 & E & 0 & 0 & F & 0 & 0 & G & G \\ C & 0 & 0 & 0 & E & 0 & 0 & F & 0 & 0 & G \\ 0 & D & F & 0 & 0 & H & 0 & 0 & I & I & 0 \\ 0 & D & 0 & F & 0 & 0 & H & 0 & 0 & I & I \\ 0 & D & 0 & 0 & F & 0 & 0 & H & 0 & 0 & I \\ 0 & 0 & J & 0 & 0 & K & 0 & 0 & M & L & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J & 0 & 0 & K & 0 & 0 & M & L \\ 0 & 0 & 0 & 0 & J & 0 & 0 & K & 0 & 0 & M \\ P & 0 & R & R & R & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_{ra} \\ \theta_{pa} \\ \theta_{rs,1} \\ \theta_{rs,2} \\ \theta_{rs,3} \\ \theta_{ps,1} \\ \theta_{ps,2} \\ \theta_{ps,3} \\ \theta_{w,0} \\ \theta_{w,1} \\ \theta_{w,2} \\ \theta_{w,3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} q_r \\ q_p \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ OT \end{pmatrix} \dots\dots\dots (7-3)$$

Table 7.3.1 天井放射パネル空調特性行列内の各変数

変数 = 定義式	パターン			変数 = 定義式	パターン		
	R80	R60	R40		R80	R60	R40
$A = K_c S_c + \alpha_{ad} + \alpha_r n S_p$	37.1	41.3	49.8	$H = \alpha_p S_p + K_{rps} S_p + K_p L_p$	7164.2	7164.2	7164.2
$A' = K_c S_c - \alpha_{ad} - \alpha_p n S_p$	-27.8	-23.6	-15.1	$I = -0.5 K_p L_p$	-9.1	-9.1	-9.1
$B = -K_c S_c - \alpha_{ad}$	-6.5	-10.7	-19.2	$J = -K_r L_p$	-0.3	-0.3	-0.3
$C = -\alpha_r S_p$	-10.2	-10.2	-10.2	$K = -K_p L_p$	-18.2	-18.2	-18.2
$D = -\alpha_p S_p$	-6.0	-6.0	-6.0	$L = \rho_w c_w Q_w + 0.5 (K_r L_p + K_p L_p)$	7.514e+6	7.514e+6	7.514e+6
$E = \alpha_r S_p + K_{rps} S_p + K_r L_p$	7150.5	7150.5	7150.5	$M = -\{ \rho_w c_w Q_w - 0.5 (K_r L_p + K_p L_p) \}$	-7.514e+6	-7.514e+6	-7.514e+6
$F = -K_{rps} S_p$	-7140.0	-7140.0	-7140.0	$P = 1 - \phi/2$	0.838	0.848	0.870
$G = -0.5 K_r L_p$	-0.130	-0.130	-0.130	$R = \phi/n$	0.108	0.101	0.087

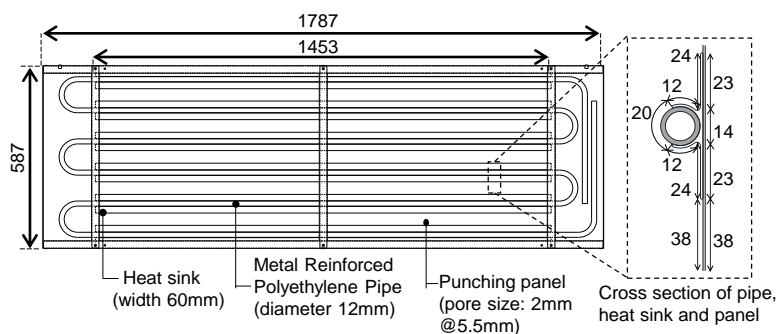


Fig. 7.3.6 想定するパネル (Fig. 4.3.2 の再掲)

Fig. 7.3.7 に従来手法の場合の参照する能力線図を示す。EN14240 に準拠した試験方法に基づく能力線図を想定しているため、居室空間のみに負荷があることを想定した処理熱量となる。なお、この能力線図は、第4章での「天井放射パネル放熱特性基礎実験」で得られた伝熱パラメータを用いて、導出したものである。

室温と冷水温度平均値（冷水入口温度と出口温度の平均値）を想定し、事前にパネルの処理熱量を見込む方法である。27.0 °C と冷水入口温度 16.0 °C と冷水温度差を 2.0 °C と仮定すると、横軸の値 ($\theta_{ra} - (\theta_{w,0} + \theta_{w,3})/2$) は、10.0 °C となる。これより、85 W/m² を見込むことを想定した。

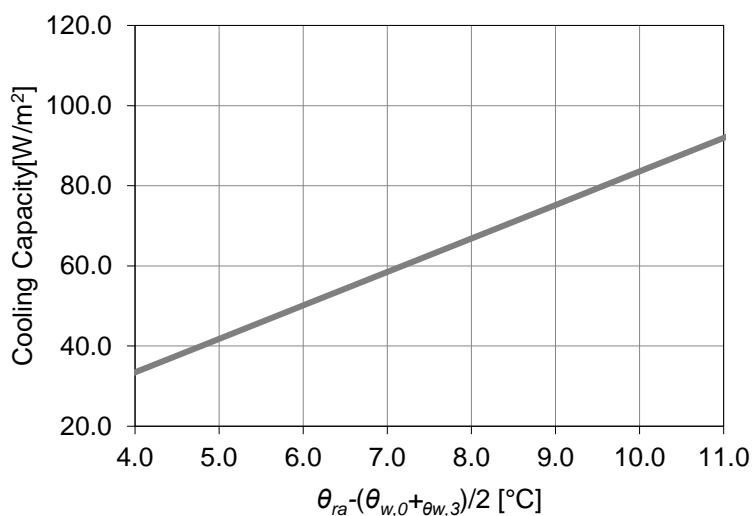


Fig. 7.3.7 従来フローで参照する能力線図

(3)天井放射パネル敷設率 80%のパターン(R80)の負荷計算結果

・ 提案フロー

Fig. 7.3.5 の熱回路網モデルを用いて、パネル居室負荷、パネル天井裏負荷を求める過程を示す。設定する温熱環境となるまで、パネル表面温度や空気温度の設定値を試行錯誤して、決定する。ここでは空気温度を 28°C とすると、平均放射温度 (MRT) は、26°C となる。ここで、居室内の表面温度は不明であるので MRT を下式にて仮定し、

$$MRT = (1 - \phi)\theta_{ra} + \phi\theta_{rs} \dots\dots\dots (7-4)$$

ここで、 $\phi = 0.324 \dots\dots\dots (7-5)$

$\theta_{ra}=28.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ と $MRT=26.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ を満たす θ_{rs} は $21.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ となる。これより、居室側と天井裏側のパネル表面温度と居室空気温度の設定値をそれぞれ $22.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $28.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ として、熱負荷計算を行う。Fig. 7.3.8 に、熱負荷が7月で最大となる日 (7/19) の結果を示す。OT の計算結果は 8:00-15:00 で設定値 $27.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ を満たしていない。そこで、パネル表面温度の設定値を $21.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ として、負荷計算を再度行う。Fig. 7.3.9 に再度行った負荷計算の結果を示す。OT の設定値 $27.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ が全時間帯で満たしている。

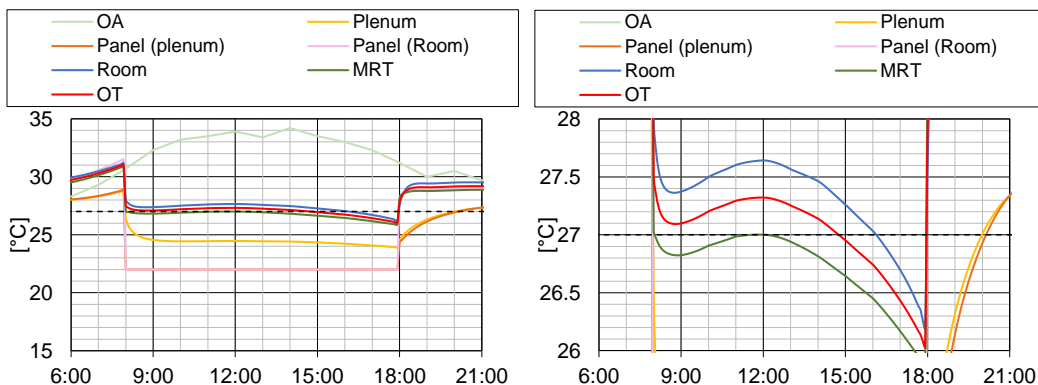


Fig. 7.3.8 パネル表面温度設定値:22°C, 空気温度設定値 : 28°Cの時の室内温熱環境 (温度) 計算結果 (左 : 温度レンジを縮小したもの)

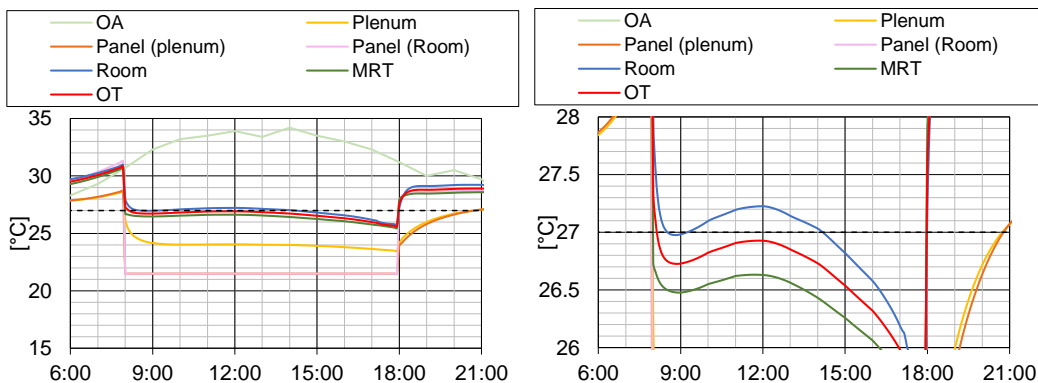


Fig. 7.3.9 パネル表面温度設定値:21.5°C, 空気温度設定値 : 28°Cの時の室内温熱環境 (温度) 計算結果 (左 : 温度レンジを縮小したもの)

第7章 設計手法の提案と省エネルギー性能の評価

これより、表面温度の設定値が 21.5 °C で居室空気温度の設定値が 28.0 °C の際に常に OT が設定値 27.0 °C となることが確認され、熱負荷計算結果から冷水入口温度を求める。Fig. 7.3.10 に熱負荷の計算結果を示す。冷水入口温度などの設備仕様を決定する際の熱負荷は、立ち上がりを除いた各時刻での平均値の最大値を採用する。パネル居室負荷と天井裏負荷は、それぞれ 2.844 kW と 0.656 kW からを入力とし、送水流量を 1.8 l/min とし、(7-3)式を用いると冷水入口温度は 16.1 °C と算出された。設定温熱環境から計算される露点温度が 14.1 °C 以上となり、結露しないことが確認され、以上より、天井放射パネルの設備仕様が決まる。

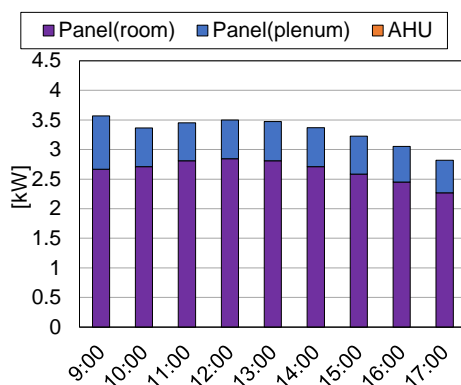


Fig. 7.3.10 パネル表面温度設定値:21.5°C, 空気温度設定値 : 28°C の時の熱負荷計算結果 (1 時間平均値)

・ 従来フロー

Fig. 7.3.11 に従来フローによる温熱環境と熱負荷の計算結果を示す。設定空気温度の設定値は提案フローと条件を同一にするため、28.0 °C とした。OT が 27.0 °C であることは確認できない。また、熱負荷は提案フローよりも低い値となっている。これは、対流式空調方式を前提とした負荷計算となっており、第 6 章で示したように対流式空調方式と天井放射パネル空調方式の違いがここにも表れている。

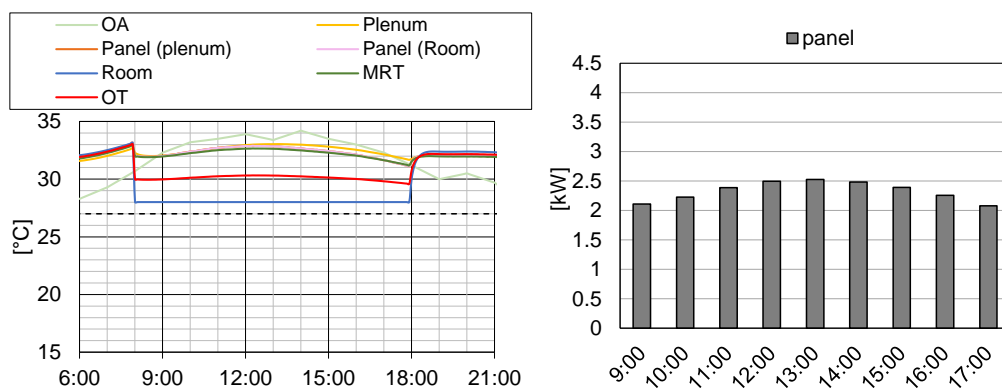


Fig. 7.3.11 従来フローによる温熱環境計算結果と負荷計算結果

(4)天井放射パネル敷設率 60%のパターン(R60)

・ 提案フロー

前項と同様に熱回路網モデルによる熱負荷計算から所定の温熱環境になることを確認しながら、パネル表面温度と空気温度の設定値を試行錯誤して、決定していく過程を示す。ここでは、居室空間のパネル以外の表面を室温と仮定して、*MRT* を算出し、*OT* の設定値となるようにパネルの表面温度を決める初期値の設定の課程は省略し、熱負荷計算結果が *OT* の設定値を満たしている2つの例を示す。

Fig. 7.3.12 はパネル表面温度と空気温度の設定値をそれぞれ 20.0 °C と 27.5 °C としたときの室内温熱環境と熱負荷計算結果である。空気温度は 27.5 °C 以下となっているため空調機負荷 (Fig. 7.3.12 中の“AHU”) は発生していない。熱負荷計算結果から得られたパネル負荷より算出されるパネル冷水入口温度は 13.1 °C と算出された。この場合、露点温度 (14.1 °C) 未満であることから、空気温度の設定値から再検討する必要がある。

Fig. 7.3.13 はパネル表面温度と空気温度の設定値をそれぞれ 21.5 °C と 27.0 °C としたときの室内温熱環境と熱負荷計算結果である。前述の設定条件よりも、パネル表面温度の設定を緩和し、居室空気の設定値を下げることで、天井放射パネルの処理する負荷を減じ、空気搬送による負荷処理への負担を増やす効果が考慮されている。熱負荷計算結果から得られたパネル負荷より算出されるパネル冷水入口温度は 15.3 °C と算出された。この場合、露点温度 (14.1 °C) 以上であり、結露しない確認される。以上より、ここで得られたパネル負荷と冷水入口温度、空調機負荷が天井放射パネルの設備仕様として決定される。

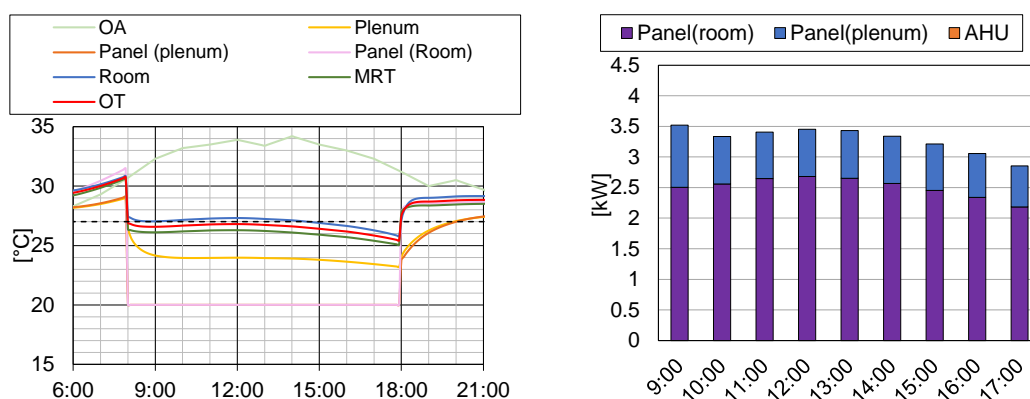


Fig. 7.3.12 パネル表面温度設定値:20°C, 空気温度設定値 : 27.5°Cの時の室内温熱環境 (温度) 計算結果 (左) と熱負荷計算結果 (右)

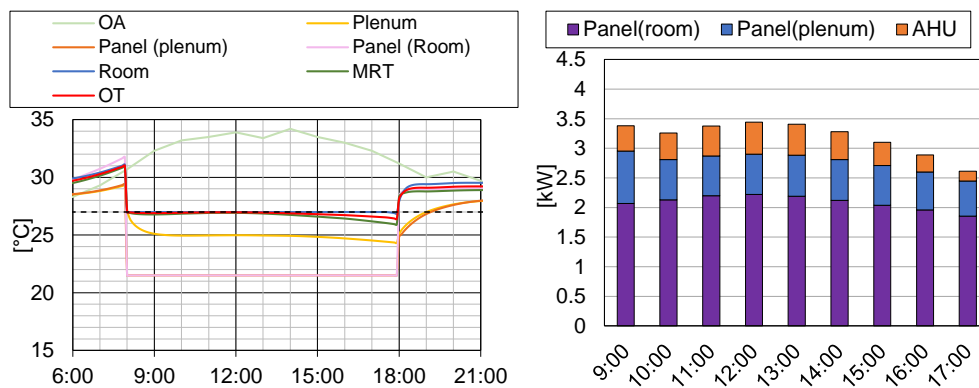


Fig. 7.3.13 パネル表面温度設定値:21.5°C, 空気温度設定値 : 27°Cの時の室内温熱環境 (温度) 計算結果 (左) と熱負荷計算結果 (右)

・ 従来フロー

Fig. 7.3.14 に従来フローによる温熱環境と熱負荷の計算結果を示す。設定空気温度の設定値は提案フローと条件を同一にするため、27.0 °Cとした。前項で示した結果と同様に、OTの設定値が満たされていない。11:00~14:00の熱負荷において、パネル負荷以外に空調機負荷が発生しており、従来フローにおいても天井放射パネル以外に何らかの手段で負荷を処理しなければならないことが示されている。ただし、提案フローよりも熱負荷は小さく計算されており、前項と同様の傾向である。

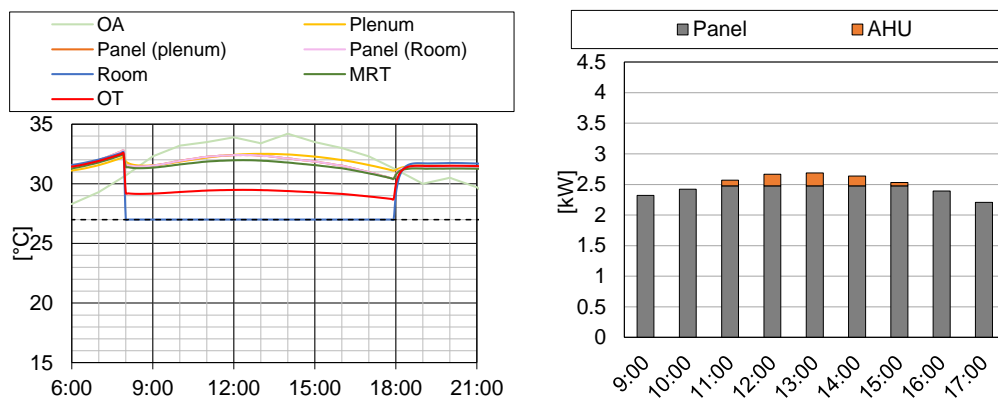


Fig. 7.3.14 従来フローによる温熱環境計算結果と熱負荷計算結果

(5) 天井放射パネル敷設率 40%のパターン(R40)

・ 提案フロー

天井放射パネル敷設率 40%のパターンでは、前々項、前項で示したような設定値の試行錯誤を行い、最終的に得られた計算結果 (Fig. 7.3.15) のみを示す。前々項と前項で示した熱負荷と比較して、天井放射パネル敷設率が小さいため、空調機負荷が大きい。ここで得られたパネル負荷から得られる冷水入口温度は 14.2 °C と算出された。この場合、露点温度 (14.1 °C) 以上であり、結露しない

確認される。以上より，ここで得られたパネル負荷と冷水入口温度，空調機負荷が天井放射パネルの設備仕様として決定される。

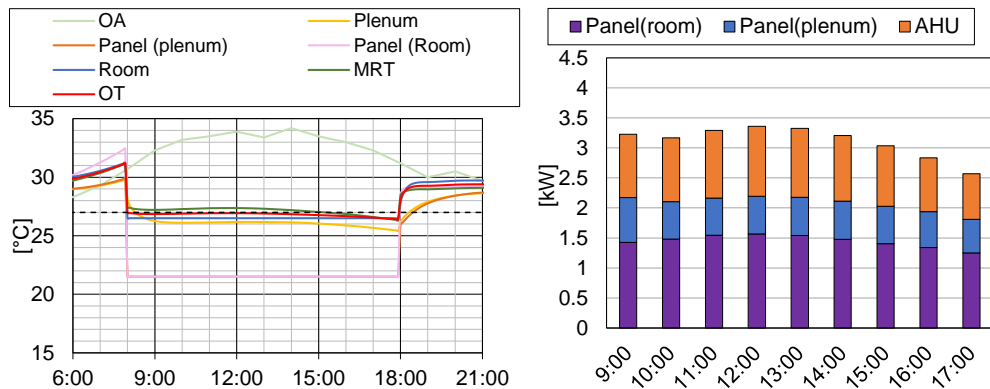


Fig. 7.3.15 パネル表面温度設定値:21.5 °C，空気温度設定値：26.5 °Cの時の室内温熱環境（温度）計算結果（左）と熱負荷計算結果（右）

・ 従来フロー

Fig. 7.3.16 に従来フローによる温熱環境と熱負荷の計算結果を示す。設定空気温度の設定値は提案フローと条件を同一にするため、26.5 °Cとした。前々項，前項で示した結果と同様に，OT の設定値が満たされていない。全時間帯において，パネル負荷以外に空調機負荷が発生しており，従来フローにおいても天井放射パネル以外に何らかの手段で負荷を処理しなければならないことが，示されている。ただし，提案フローよりも熱負荷は小さく計算されており，前々項，前項と同様の傾向である。

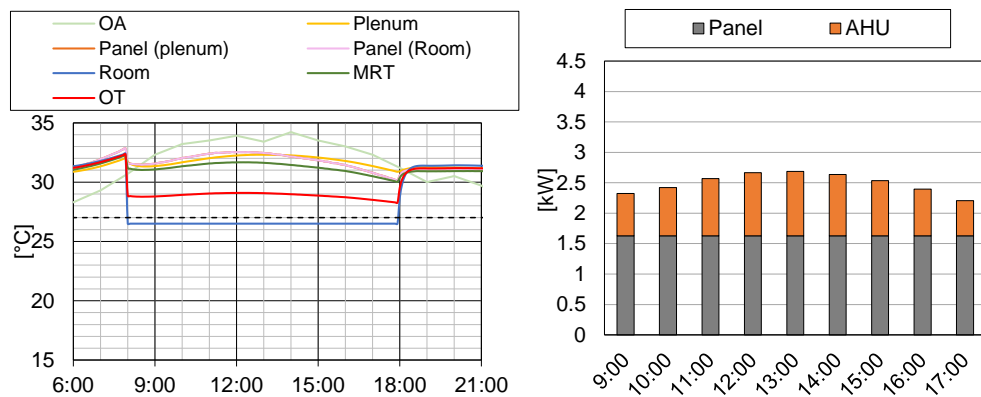


Fig. 7.3.16 従来フローによる温熱環境計算結果と熱負荷計算結果

第7章 設計手法の提案と省エネルギー性能の評価

(6) 天井放射パネル空調設備仕様決定フロー試行結果まとめ

Table 7.3.2 に天井放射パネル空調設備仕様決定フローの試行結果のまとめを示す。居室空気温度やパネル表面温度は、熱回路網モデルによる熱負荷計算結果により得られた最大負荷時の計算値を示している。

パネル負荷及び空調機負荷に関しては、従来フローよりも提案フローのほうが、大きい。天井放射パネル空調において、①天井放射パネルが天井裏を冷却すること、②日射など高温となる表面と天井放射パネル表面が放射熱伝達により直接に熱交換することの2点から、一般的な空調方式よりも熱負荷が大きくなるという特性があることを第6章で示した。提案フローで得られたパネル負荷及び空調機負荷はこれらの特性が反映された結果である。従来フローのように空気温度のみを設定値とした熱負荷計算方法では、天井放射パネル空調の特性の考慮ができないことが明らかになった。

冷水入口温度に関しては、従来フローよりも提案フローのほうが、低くなっている。天井放射パネル空調性能予測手法を用いることで、適正な冷水入口温度を決定することが可能であることを示した。

以上より、適正な設備仕様で天井放射パネル空調を行うためには、①天井放射パネル空調の熱負荷特性、②居室側のみならず天井裏側を含めたパネル負荷を算出することが重要であることを示した。

Table 7.3.2 試行結果まとめ

天井放射パネル敷設率		80%		60%		40%		
設備仕様決定フロー		提案	従来	提案	従来	提案	従来	
居室空気温度	°C	27.8	28.0	27.0	27.0	26.5	26.5	
パネル表面温度	°C	21.5	-	21.5	-	21.5	-	
作用温度	°C	26.8	-	27.0	-	26.9	-	
パネル負荷	居室側	kW	2.844	-	2.200	-	1.566	-
	天井裏側	kW	0.656	-	0.684	-	0.527	-
	合計	kW	3.500	2.525	2.904	2.479	2.193	1.647
	m ² あたり※	W/m ²	90.0	64.9	99.6	84.7	112.8	84.7
冷水入口温度	°C	16.1	16.0	15.3	16.0	14.2	16.0	
空調機負荷	W	0	0	0.538	0.208	1.166	1.118	

※ パネル面積当たりの熱負荷

7.3.3 外気処理システムの選定

天井放射パネル空調を構築するにあたって、①適正な空気環境の維持、②湿度環境の維持、③結露防止という観点で、適切な外気処理システムの設計が重要である。本項では、5つの除湿方式に関して比較検討を行うことで、外気処理システムの設計プロセスの例を示す。

(1) 冷却除湿方式①

ここでは、機器構成が最小限となる、冷却除湿方式に関する検討について示す。外気供給量 Q_{sa} : 200m³/hとした場合に供給すべき絶対湿度は下式で求められる。

$$m = LH / (c_v \theta_{ra} + r_0) (= 0.000266) [\text{kg/s}] \dots\dots\dots (7-6)$$

$$X_{sa} = X_{ra} - \frac{m}{\rho_a Q_{sa} / 3600} (= 0.006) [\text{kg/kg(DA)}] \dots\dots\dots (7-7)$$

ここで、 $LH = 680 [\text{W}] \dots\dots\dots (7-8)$

$$c_v = 1846 [\text{J/kg} \cdot \text{K}] \dots\dots\dots (7-9)$$

$$r_0 = 2.501 \times 10^3 [\text{J/kg}] \dots\dots\dots (7-10)$$

$$\rho_a = 1.166 [\text{kg/m}^3] \dots\dots\dots (7-11)$$

これより空気線図から供給外気の乾球温度 θ_{sa} は 8.0 °C (Fig. 7.3.17) , 供給外気処理頭熱量 $q_{s,OHU}$ は(7-1)式より、1.240 kW と算出される。この設備仕様の場合、供給外気乾球温度が、居室空気の露点温度よりも低く、外気供給吹き出し口で結露が発生する懸念があり、外気供給システムとしては適さない。

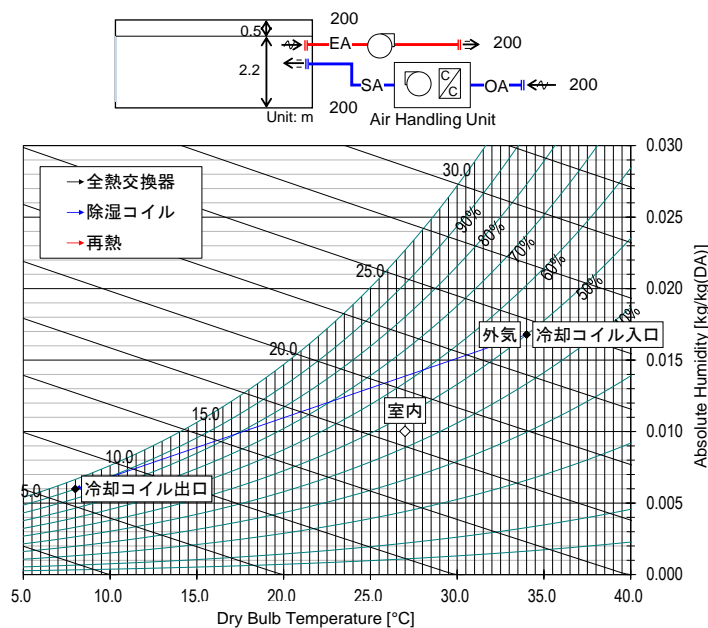


Fig. 7.3.17 外気処理システムの選定 (冷却除湿方式①)

第7章 設計手法の提案と省エネルギー性能の評価

(2) 冷却除湿方式②

そこで、冷却除湿方式①から、排気の一部を居室側から還気を混合する場合について検討する。供給風量 Q_{sa} を $800 \text{ m}^3/\text{h}$ とし、循環風量 $600 \text{ m}^3/\text{h}$ とすると、(1)項と同様の方法で供給すべき絶対湿度は下式で求められる。

$$X_{sa} = X_{ra} - \frac{m}{\rho_a Q_{sa} / 3600} (= 0.009) [\text{kg/kg(DA)}] \dots\dots\dots (7-12)$$

これより空気線図から供給外気の乾球温度 θ_{sa} は $14.0 \text{ }^\circ\text{C}$ (Fig. 7.3.18) , 供給外気処理顕熱 $q_{s,OHU}$ は(7-1)式より、 3.390 kW と算出される。供給外気の空気状態に関しては、結露の懸念がなく、外気を供給できる設備仕様となった。ただし、供給外気処理顕熱に関しては、「7.3.2.1 天井放射パネル空調設備仕様決定フローの試行」において、パネル負荷及び空調機負荷の合計は $3.359 \sim 3.500 \text{ kW}$ であり、外気処理システムが居室の負荷をほぼ処理してしまう。そのため、本システムは、天井放射パネル空調は共存せず、天井放射パネル空調に用いる外気処理システムに不適である。

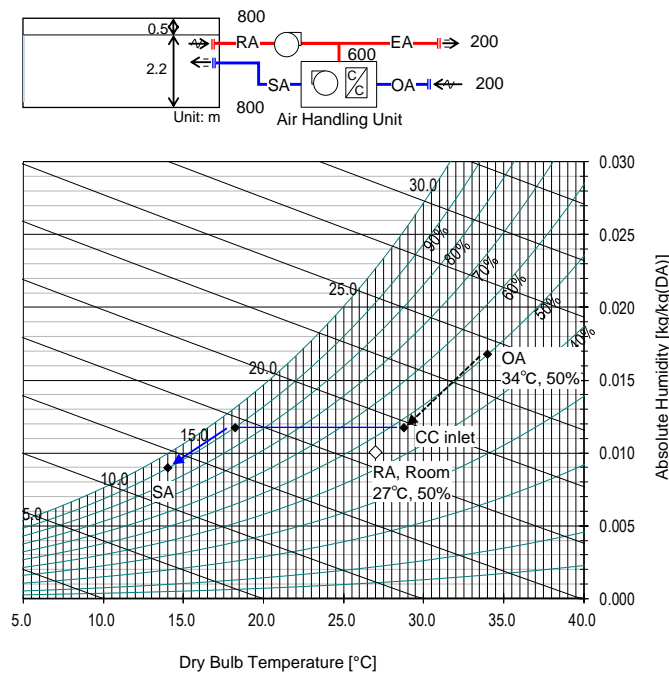


Fig. 7.3.18 外気処理システムの選定 (冷却除湿方式②)

(3) 冷却除湿方式③（全熱交換器・顕熱交換器組み込み外気処理空調機）

循環風量を大きくすると、潜熱負荷を処理すると同時に顕熱の除去量が大きくなり、天井放射パネルで賄うべき負荷が小さくなる。天井放射パネルと外気処理システムをバランスよく設計するためには、外気処理システムにおける風量は最小限にして、結露の懸念のない外気を供給する必要がある。

既往文献¹⁹⁾を参考にして、顕熱交換器と全熱交換器を組み合わせた外気処理空調機を検討する。Fig. 7.3.19 に検討の対象とする外気処理システムの構成と空気線図を示す。冷却コイルの出口絶対湿度は冷却除湿方式①と等しいが、冷却コイルにより除湿処理された外気（CC outlet）と還気（RA）を顕熱交換器により熱交換して、供給外気をなるべく居室空気の乾球温度と近づけ、居室に外気を供給する（SA）。また、冷却コイルの冷却負荷を削減するために、除湿処理外気と顕熱交換された還気（EW(RA)）と外気は全熱交換器により熱交換された外気を冷却コイルに供給する。

本システムにおける供給外気の乾球温度 θ_{sa} は $17.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、供給外気処理顕熱量 $q_{s,OHU}$ は(7-1)式より、 0.620 kW と算出される。なお、全熱交換器及び顕熱交換器の熱交換効率はそれぞれ 50% と想定した。供給外気処理顕熱量は「7.3.2.1 天井放射パネル空調設備仕様決定フローの試行」において、パネル負荷及び空調機負荷と比べて、 18% 程度であり、天井放射パネル空調と共存する。本システムは、天井放射パネル空調に適した外気処理システムとして、選定が可能であると考えられる。

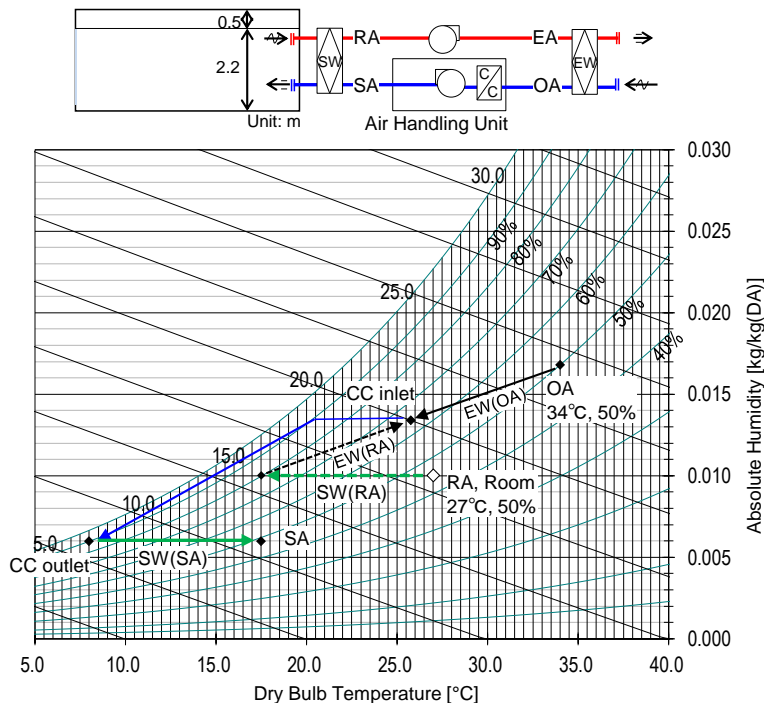


Fig. 7.3.19 外気処理システムの選定（熱交換器組み込み外気処理空調機）

第7章 設計手法の提案と省エネルギー性能の評価

(4) デシカント方式（デシカントローター組み込み外気処理空調機）

本ケーススタディでの条件に合致するようにデシカント方式の外気処理システムを設計すると Fig. 7.3.20 の空気線図のようになる。各プロセスにおける空気の状態は、EnergyPlus²⁰⁾に組み込まれたデシカント空調機のモデルを参考にして、構築した予測式をもとに算出した。なお、空調機メーカーからのヒアリングによるデシカントローターの試験データを用いて、モデルのパラメータを同定した。

供給外気処理顕熱量はゼロとなり、室内顕熱の 100% を天井放射パネルにより行うことができるシステムとなる。

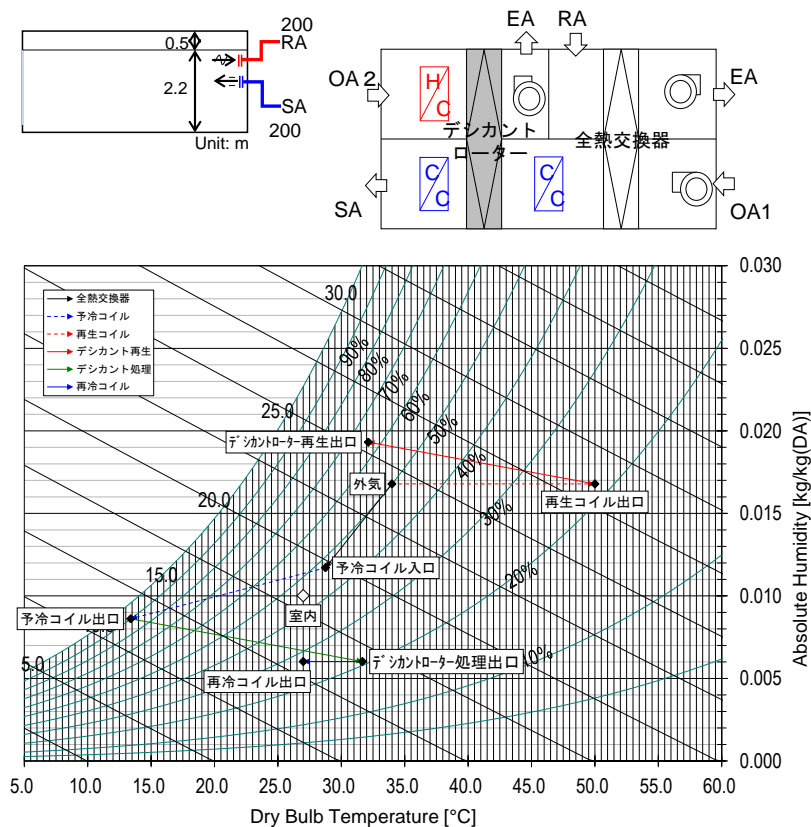


Fig. 7.3.20 外気処理システムの選定（デシカント式外気処理空調機）

(5) 外気処理システムの比較評価

以上の検討結果を Table 7.3.3 にまとめた。評価の欄は、下記の方針より一致しているかどうかを3段階で評価した。以下の I.~III.は、条件を満たさないときには重大な不具合となると考えられるため、必須の条件とした。

- I. 再熱は省エネルギーの観点で行わない。
- II. 外気供給乾球温度は吹出口の結露防止の観点で 14.0 °C 以上とする。
- III. 供給外気処理顕熱量はパネル負荷及び空調機負荷の合計を超えない
- IV. 給気, 排気, 還気風量は搬送動力削減の観点で最小限に抑える。
- V. 単純なシステム構成とする。

冷却除湿方式①と②は、それぞれ II.と III.を満たさないため「×」の評価とした。冷却除湿方式③とデシカント方式の比較となるが、V.の観点でデシカント方式は、冷温水コイルの数が多いことや、再生用の熱源が必要なことを鑑みると、冷却除湿方式③のほうが優れていると考え、冷却除湿方式③を今回の試行において採用することにした。

なお、デシカント方式は、排熱や太陽集熱システムなど自然エネルギーが有効利用できることなど、適用する建物の用途や条件によっては、天井放射パネル空調と併用する外気処理システムとして適する場合もある。ただし、本研究では、これに関しては扱わない。

Table 7.3.3 外気処理システムの比較

外気処理システム	風量			コイル仕様				供給外気処理顕熱量 [kW]	評価
	OA [m ³ /h]	SA [m ³ /h]	EA [m ³ /h]	θ_{SA} [°C]	予冷 [kW]	再冷 [kW]	再生 [kW]		
冷却除湿方式①	200	200	200	8.0	3.6	-	-	1.29	×
冷却除湿方式②	200	800	800	14.0	5.8	-	-	3.39	×
冷却除湿方式③	200	200	200	17.5	2.4	-	-	0.62	○
デシカント方式	200	200	200	27.0	1.6	0.3	1.1	0.00	△

7.3.4 補助顕熱処理設備の要否判断

天井放射パネル空調設備仕様決定フローにより決定されるパネル負荷・空調機負荷と供給外気処理顕熱量と比較により、補助顕熱処理設備の要否判断を行う。Fig. 7.3.21 は三つのパターンごとに各負荷の比較を示したグラフである。

R40(敷設率 40%)では供給外気処理顕熱量は空調機負荷よりも小さくなり、補助顕熱処理設備が必要と判断される。補助顕熱処理設備の対応策としては、以下の2点が考えられる。

- ① 外気処理システムに循環風量を増やし、冷却コイルを増設する (Fig. 7.3.22)
- ② 居室にFCUを増設する (Fig. 7.3.23)

本ケーススタディで設定した建築仕様において、R60及びR80(敷設率 60%及び80%)に関しては、供給外気処理顕熱量が空調機負荷よりも大きく、補助顕熱処理設備は不要と判断される。このように外気処理システムが処理する顕熱負荷も含めて天井放射パネル、補助顕熱処理設備の処理すべき熱負荷を決定することが可能となる。また、建築仕様条件により、天井放射パネルの敷設率が高くても、補助顕熱処理設備が必要とされる場合や、敷設率が低くても補助顕熱処理設備が必要とされない場合が考えられる。そのため、建築仕様条件を含めた検討が必要であると考えられる。

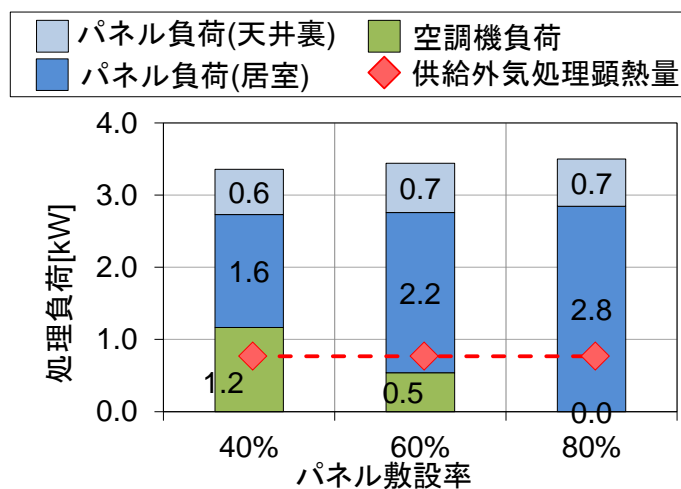


Fig. 7.3.21 パネル負荷 (天井裏・居室)・空調機負荷と供給外気処理顕熱量の比較

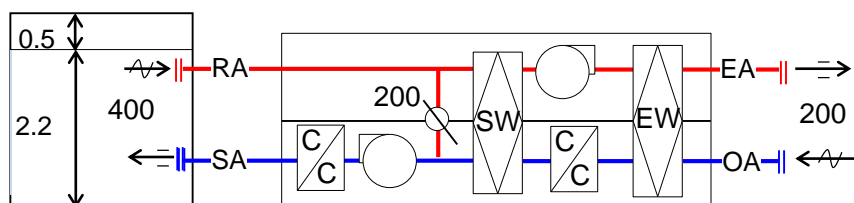


Fig. 7.3.22 補助顕熱処理設備の対応方法：外気処理システムの増強

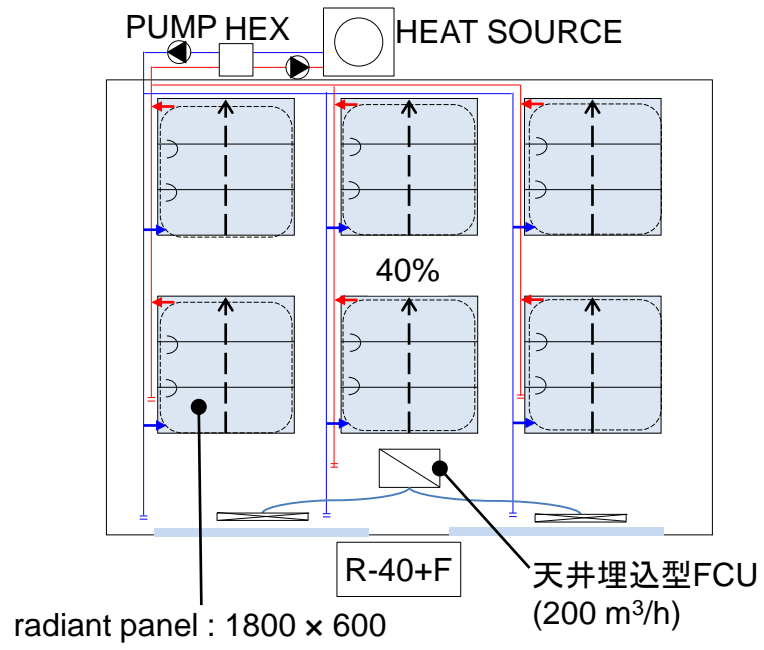


Fig. 7.3.23 補助顕熱処理設備の対応方法 : FCU の増設

7.4 省エネルギー性能評価方法

前節の設計フローの試行の結果を踏まえ、搬送設備や熱源設備の設計を行った。設計したシステムに関して、省エネルギー性能の観点での評価のために、エネルギーシミュレーションを行った。本節ではシミュレーションに関する計算条件、計算手法について示す。

7.4.1 設計フローの試行により得られた設備システム概要及びシミュレーションパターン

Table 7.4.1 に各シミュレーションパターンにおける想定条件を示す。前節で示した設備仕様決定フローから決定した熱負荷をもとに設計した搬送システムや熱源システムの仕様も併記している。ファンの静圧やポンプの揚程は、ダクトや配管経路でのメーカーから示されている各機器の仕様を参考にして、想定して求めた。

天井放射パネル空調に関しては、設計フローで試行した 3 つの敷設率条件 (40%: R-40, 60%: R-60, 80%: R-80) を踏襲する。

R-60 と R-80 の外気処理システムは「7.3.3 外気処理システムの選定」で決定した顕熱交換器と全熱交換機を組み込んだ冷却除湿方式②を想定している (Fig. 7.4.1)。

敷設率が 40% のパターンに関しては室内顕熱負荷を放射パネルのみでは処理できないので、補助顕熱処理設備の対応として、R-40 の外気処理システムは顕熱交換器の OA 出口側で 200 m³/h の還気と混合し、混合した空気を顕熱コイルで再冷する方式 (Fig. 7.4.2) とした。

R-40+F の外気処理システムは R-60 と R-80 と同様のシステムとして、居室内にファンコイルユニット (以下、FCU) を増設する方式 (Fig. 7.2.6) とした。天井放射パネル空調において、ペリメータの負荷を処理するための対応策として一般的に採用されている方式である。

天井放射パネル空調との比較のための一般空調方式は、4 パターン (C-Gen, C-Gen+F, C-Adv, C-Adv+F) を想定した。

C-Gen はもっとも一般的な空調方式として想定した。単一ダクト方式とし、外気は過冷却により除湿する方式で、空調機のみで外気処理と室内の顕熱処理を行う、一番単純な機器構成とした。外気供給量は 200 m³/h、循環還気量は 800 m³/h とした。

C-Gen+F は、C-Gen での顕熱処理を居室側の FCU により担う空調方式である。機器構成としては、C-Gen と比べて、設備機器が増えるが、居室内の負荷に対する個別制御を求められる時に、採用される方式であると考えられる。また、C-Gen での循環還気を FCU を追加することで省略することができ、空調機のファン動力削減が可能となることが想定される。

C-Adv は、C-Gen において、夏期の外気処理負荷を低減するための空調方式として想定したシステムである。天井放射パネル空調のパターンの外気処理システムと同様の機器構成としている。C-Gen と同様に外気供給量は 200 m³/h、循環還気量は 800 m³/h とし、還気と除湿処理された外気と混合した空気を冷却コイルにより、室内の顕熱を処理すること想定している。

第 7 章 設計手法の提案と省エネルギー性能の評価

C-Adv+F は、C-Gen+F と同様に、C-Adv での顕熱処理を居室側の FCU により担う空調方式である。全熱交換器と顕熱交換器による外気負荷削減と FCU による居室側での負荷処理による空気搬送動力削減が可能であり、一般空調方式としては、ここで考えられるパターンの中では省エネルギー性能が高い方式として想定される。

Fig. 7.4.8～Fig. 7.4.14 に各パターンでの熱源フローを示す。C-Gen、C-Gen+F を除くパターンでの熱源システムは、室内顕熱負荷を処理する系統と外気の潜熱負荷を処理する系統の 2 系統に分けたシステムを想定している。C-Gen では通常熱源のみで冷却と除湿を行うシステムを想定している。熱源及び 2 次側の水及び空気の搬送量は一定とする CWV、CAV 方式を想定している。

Table 7.4.1 設備システムの仕様表兼シミュレーションパターン

Case		C-Gen	C-Gen+F	C-Adv	R-40	C-Adv+F	R-40+F	R-60	R-80	
作用温度設定値 [°C]		27.0								
設定絶対湿度 [kg/kg(DA)]		0.006								
放射パネル敷設率		-	-	40%	-	40%	60%	80%		
外気処理システム	熱交換器	全熱交換器+顕熱交換器								
	コイル	除湿冷却コイル		除湿コイル	+顕熱コイル	除湿コイル				
放射+FCUポンプ	流量 [l/min]				10.8	-	10.8	16.2	21.6	
	揚程 [m]				2.86	-	2.86	2.86	2.86	
	電力 [W]				7.2	-	7.2	10.8	14.4	
給気ファン	風量 [m³/h]	1000	200	1000	400	200				
	静圧 [Pa]	582	415	715	815	715				
	電力 [W]	270	38	394	151	66				
排気ファン	風量 [m³/h]	200	200	200						
	静圧 [Pa]	215	215	515						
	電力 [W]	20	20	48						
ファンコイルユニット	風量 [m³/h]		200			200	200			
	静圧 [Pa]		250			250	250			
	電力 [W]		66			66	66			
	台数		4			4	1			
高顕熱型熱源	主機	定格能力 [W]	-		3781	3340	33	3340	2944	3447
		定格 COP [-]	-		3.0/4.0/5.0					
	ポンプ	流量 [l/min]			10.8	9.6	10.8	9.6	8.4	9.9
		揚程 [m]			6.8	6.9	6.8	6.9	6.9	6.9
	電力 [W]			17.3	15.3	17.3	15.3	13.5	15.8	
通常熱源	主機	定格能力 [W]	6955		2788	2817	2788	2817	2837	2837
		定格 COP [-]	3.0		3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
	ポンプ	流量 [l/min]	19.9		8.0	8.1	8.0	8.1	8.1	8.1
		揚程 [m]	9.0		9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0
	電力 [W]	41.8		16.8	16.9	16.8	16.9	17.1	17.1	

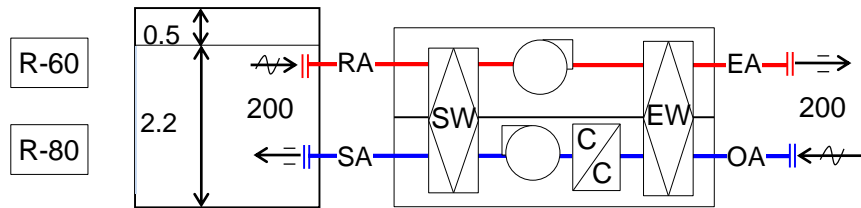


Fig. 7.4.1 R-80, R-60, R-40+F, C-Adv+F の外気処理システム構成

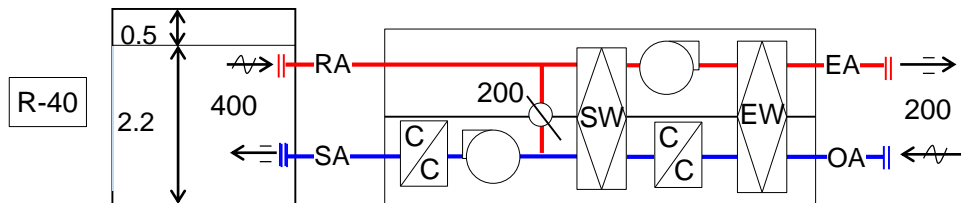


Fig. 7.4.2 R-40 の外気処理システム構成

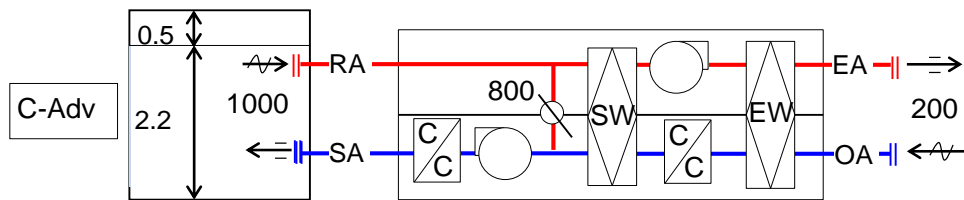


Fig. 7.4.3 C-Adv の外気処理システム構成

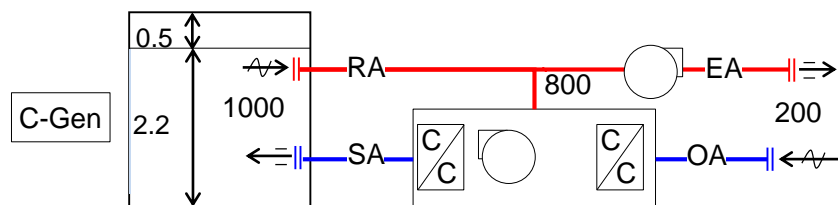


Fig. 7.4.4 C-Gen の外気処理システム構成

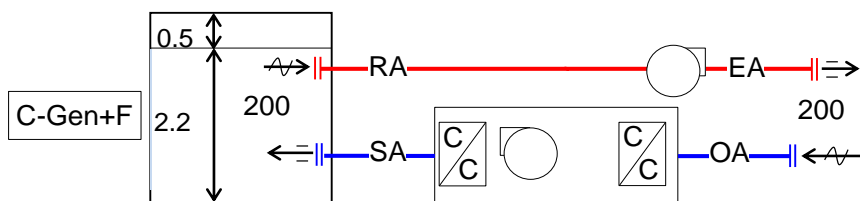


Fig. 7.4.5 C-Gen+F の外気処理システム構成

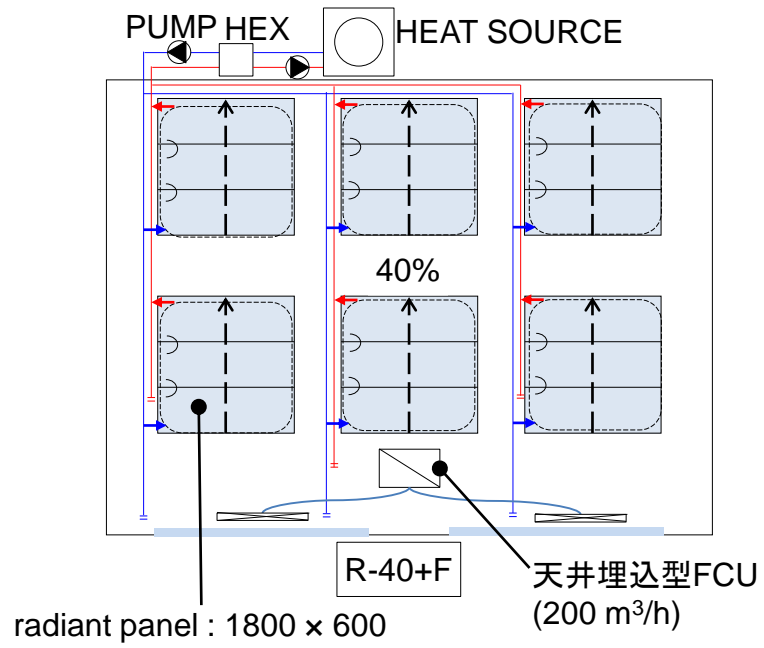


Fig. 7.4.6 R-40+F の天井放射パネルとファンコイルユニットの配置

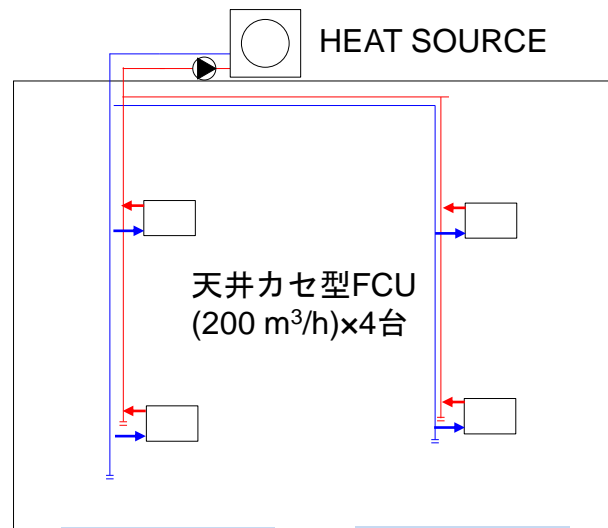
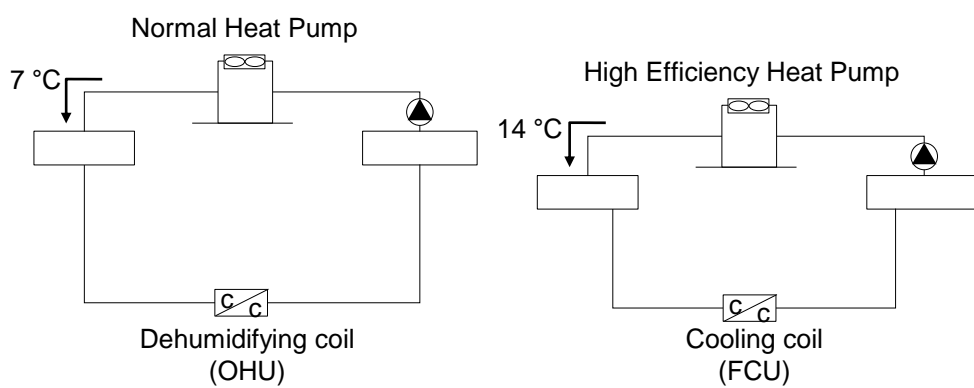
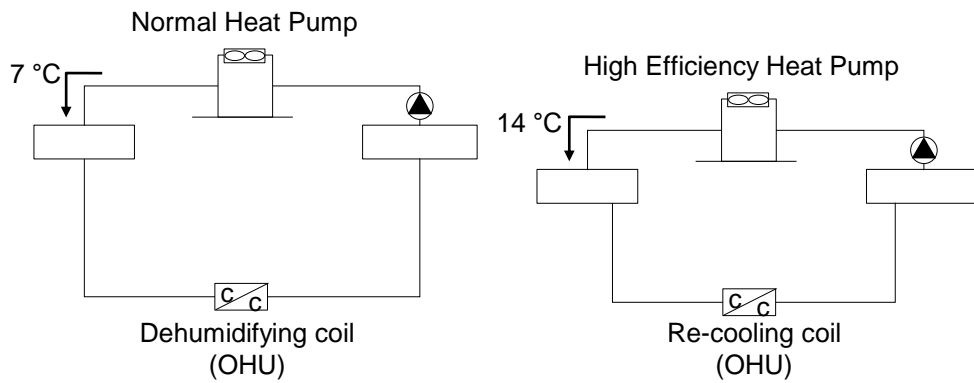
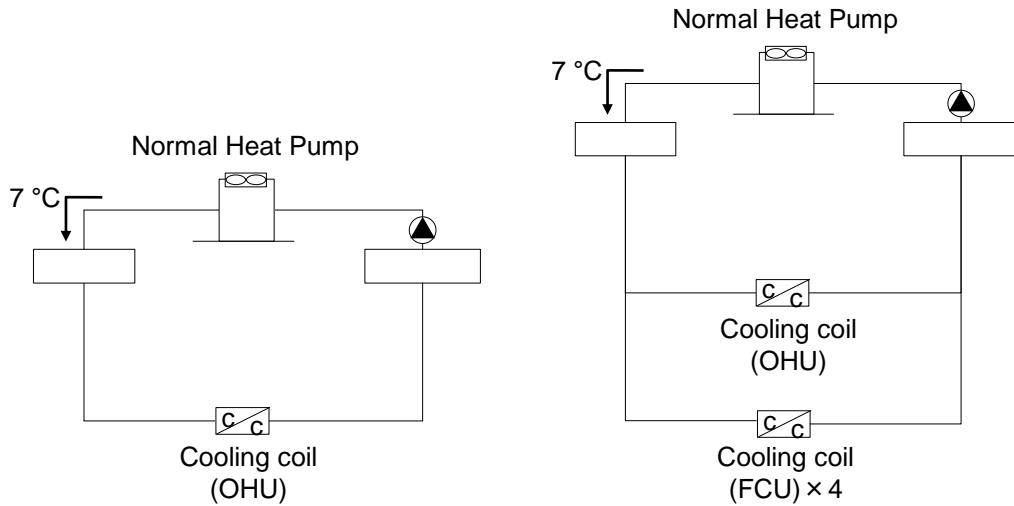


Fig. 7.4.7 C-Gen+F と C-Adv+F のファンコイルユニットの配置



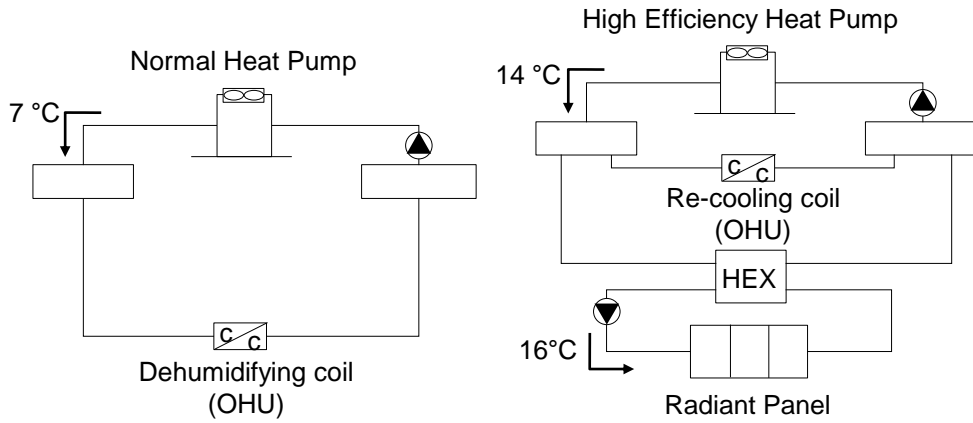


Fig. 7.4.12 R-40 熱源系統図

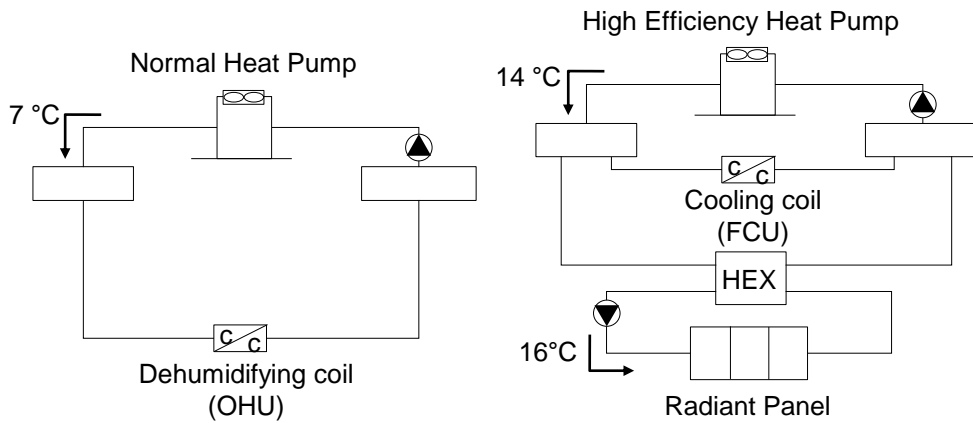


Fig. 7.4.13 R-40+F 熱源系統図

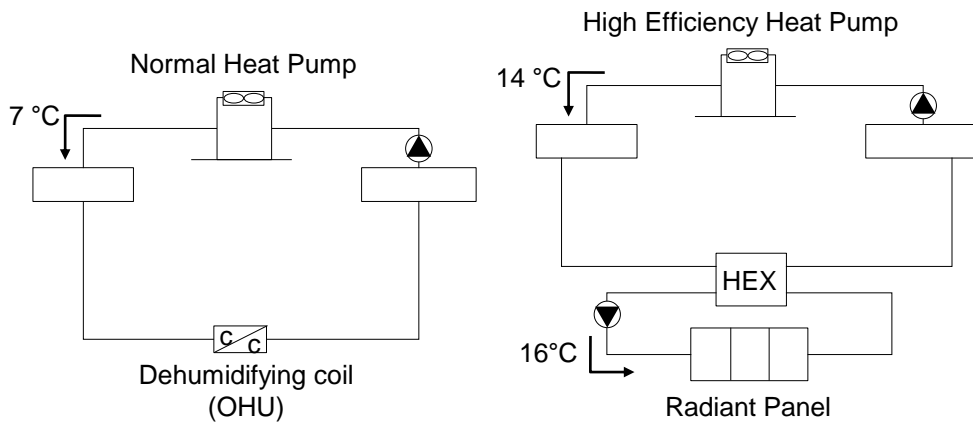


Fig. 7.4.14 R-60, R-80 熱源系統図

気象条件は拡張アメダス気象データ（1991－2001）を用い、地域は東京とした。シミュレーション期間は 6/1～9/30 とし、空調の運転時間は 8:00～18:00 とした。Fig. 7.4.15 から 7.4.17 に、それぞれシミュレーション期間中の外気温度、外気湿度、日射量を示す。

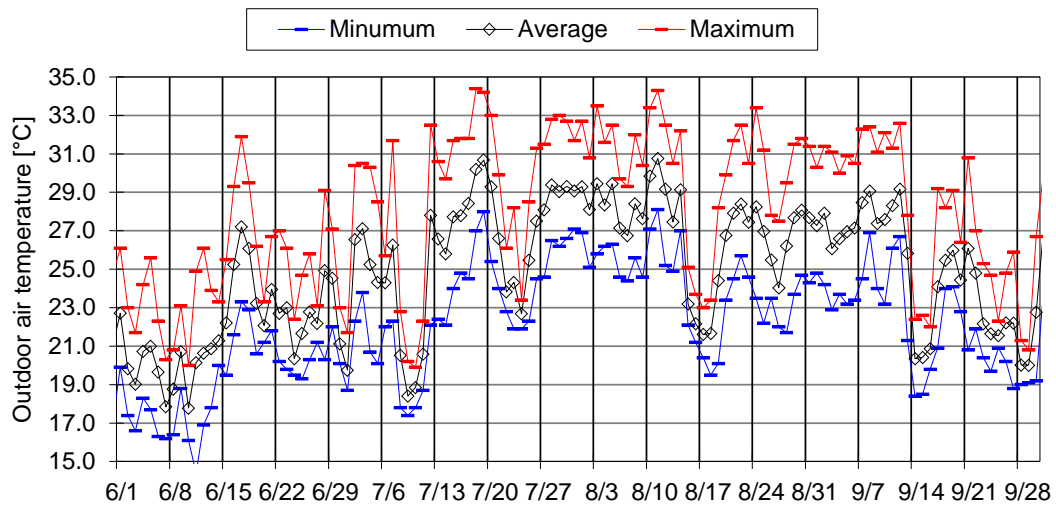


Fig. 7.4.15 外気温度条件 (6/1~9/30)

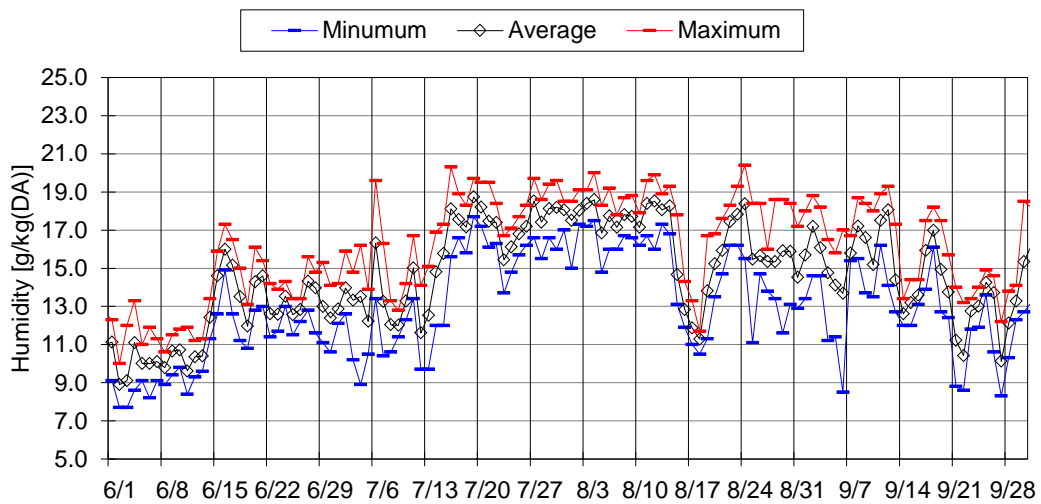


Fig. 7.4.16 外気湿度条件 (6/1~9/30)

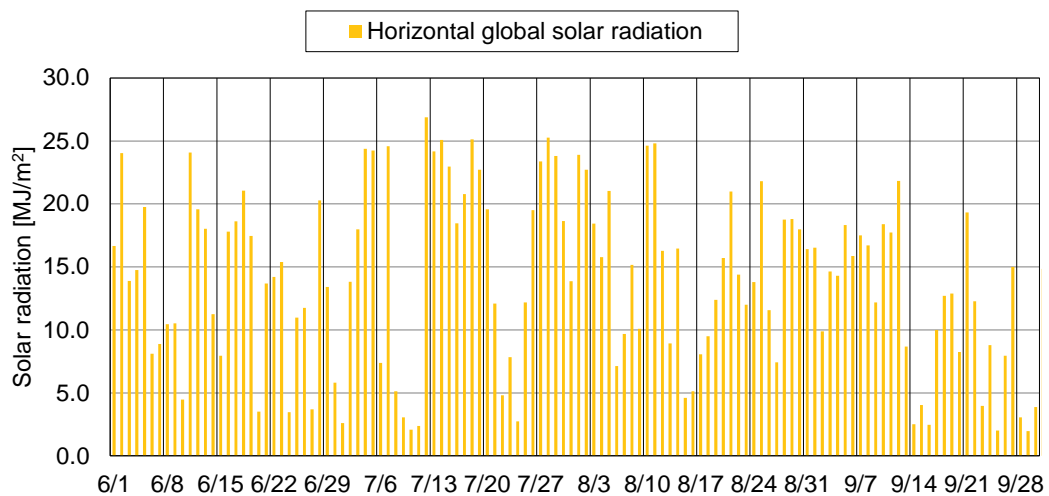


Fig. 7.4.17 日射条件 (6/1~9/30)

7.4.2 省エネルギー性能計算方法

(1) 2次側負荷計算方法

Fig. 7.4.18～7.4.20 にパネル処理熱量，コイル処理熱量（顕熱及び潜熱負荷）を算出するための熱回路網モデルを示す。負荷に応じて，居室の作用温度や給気の絶対湿度が設定値となるように，各節点の吸熱量（処理熱量）を調整する制御がモデル内に組み込まれている。

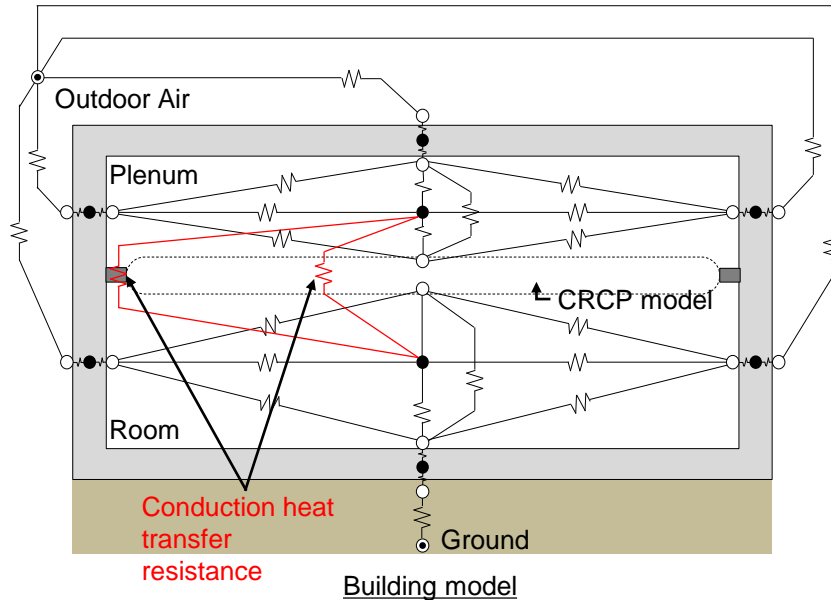


Fig. 7.4.18 建築モデル

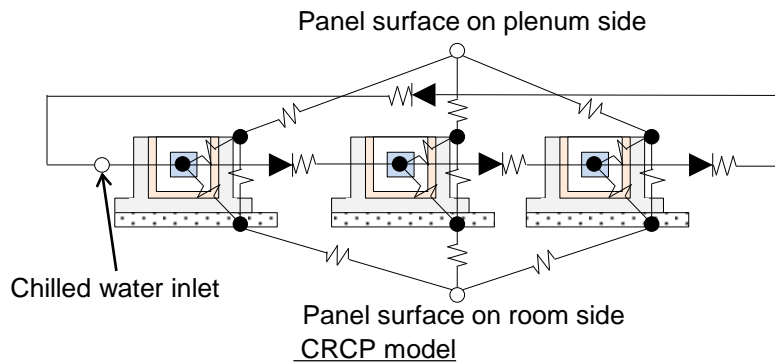


Fig. 7.4.19 天井放射パネル熱回路網モデル

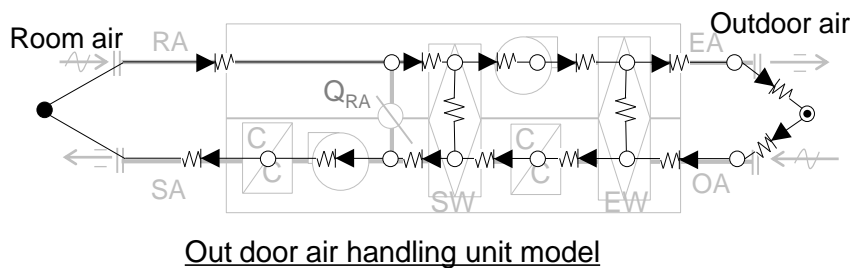


Fig. 7.4.20 外気処理空調機モデル（熱交換器組み込み）

(2) 搬送動力計算方法

水搬送動力（ポンプ）及び空気搬送動力（ファン）に関しては、下式の理論式により算出した。

$$P_{Pump} = \rho g Q_w H / \eta_p / 60000 \dots\dots\dots (7-13)$$

$$P_{Fan} = Q_A P_T / \eta_F / 3600 \dots\dots\dots (7-14)$$

(3) 熱源動力計算方法

熱源動力に関しては EnergyPlus による方法²⁰⁾を参考にし、下式を用いて計算を行った。

$$P_{Chiller} = Q_{ref} / COP_{ref} \cdot CAPFT \cdot EIRFT \cdot EIRFPLR \dots\dots\dots (7-15)$$

$$CAPFT = a_1 + b_1 T_{cw,l} + c_1 T_{cw,l}^2 + d_1 T_{OA} + e_1 T_{OA}^2 + f_1 T_{cw,l} \cdot T_{OA} \dots\dots\dots (7-16)$$

$$EIRFT = a_2 + b_2 T_{cw,l} + c_2 T_{cw,l}^2 + d_2 T_{OA} + e_2 T_{OA}^2 + f_2 T_{cw,l} \cdot T_{OA} \dots\dots\dots (7-17)$$

$$EIRFPLR = a_3 + b_3 PLR + c_3 PLR^2 \dots\dots\dots (7-18)$$

$$Q_{avail} = Q_{ref} \cdot CAPFT \dots\dots\dots (7-19)$$

$$PLR = Q_{load} / Q_{avail} \dots\dots\dots (7-20)$$

熱源の特性は、既往文献²¹⁾で示される空冷ヒートポンプの特性値に相似することをとした。熱源の定格条件、外気温度と出口温度特性及び部分負荷特性を、それぞれ Table 7.4.1、Table 7.4.2・7.4.3 及び Fig. 7.4.21 に示す。

Table 7.4.1 想定熱源の定格条件

冷却能力 [kW]	150	外気温度: 35°CDB
冷却消費電力 [kW]	49.8	
冷水流量 [L/min]	430	
冷水温度 [°C]	12→7	
冷水圧力損失 [kPa]	46	

第7章 設計手法の提案と省エネルギー性能の評価

Table 7.4.2 想定熱源の外気温度・出口温度(5~7℃)特性データ

外気温度	出口温度差	冷水出口温度 [°C]								
		5			7			9		
		能力	水量	消費電力	能力	水量	消費電力	能力	水量	消費電力
°C DB	°C	kW	L/min	kW	kW	L/min	kW	kW	L/min	kW
40	5	124	355	54.1	141	403	55.3	156	446	56.5
35	5	135	386	48.7	150	430	49.8	163	468	50.8
30	5	144	414	44	158	454	45	170	488	46
25	5	153	439	40	166	476	41	176	506	41.8
20	5	160	459	36.8	172	494	37.7	182	521	38.5
15	5	166	477	34.3	178	510	35.1	186	535	35.8
10	5	168	482	33.2	179	515	33.9	188	540	34.5
5	5	168	482	32.2	179	515	32.9	188	540	33.5
0	5	168	482	31.5	179	515	32.1	188	540	32.7
-5	5	168	482	30.9	179	515	31.5	188	540	32

Table 7.4.3 想定熱源の外気温度・出口温度(11~15℃)特性データ

外気温度	出口温度差	冷水出口温度 [°C]								
		11			13			15		
		能力	水量	消費電力	能力	水量	消費電力	能力	水量	消費電力
°C DB	°C	kW	L/min	kW	kW	L/min	kW	kW	L/min	kW
40	5	169	484	57.6	181	518	58.5	190	545	59.4
35	5	175	501	51.8	184	528	52.7	192	550	53.5
30	5	180	516	46.8	188	538	47.6	193	554	48.3
25	5	185	530	42.6	191	547	43.3	195	558	43.9
20	5	189	542	39.2	194	555	39.8	196	562	40.3
15	5	193	552	36.5	196	563	37	198	567	37.5
10	5	194	557	35.1	198	567	35.6	199	571	36
5	5	194	557	34	198	567	34.5	199	571	34.8
0	5	194	557	33.1	198	567	33.5	199	571	33.9
-5	5	194	557	32.5	198	567	32.8	199	571	33.1

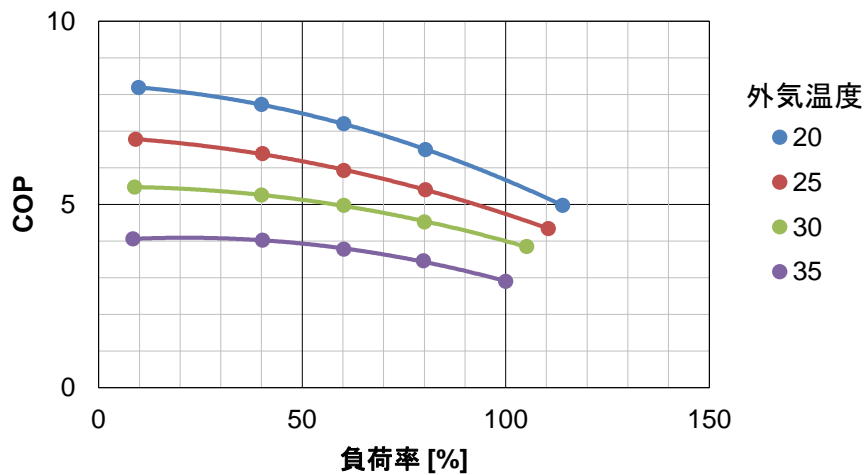


Fig. 7.4.21 部分負荷特性グラフ

ここに示す熱源特性を用いて、(7-15)式～(7-20)式の各パラメータ ($a_1 \sim f_1$, $a_2 \sim f_2$, $a_3 \sim c_3$) を非線形最小二乗法により同定した。Table 7.4.4 に同定したパラメータの一覧を示す。また、Fig. 7.4.22, Fig. 7.4.23 及び Fig. 7.4.24 にそれぞれ冷水出口温度・外気温度能力特性係数, 冷水出口温度・外気温度消費電力特性係数及び部分負荷特性係数の同定結果を示す。

Table 7.4.4 同定パラメータ一覧

係数	数値	係数	数値	係数	数値
a_1	0.958	a_2	0.615	a_3	0.030
b_1	0.051	b_2	8.327e-03	b_3	0.331
c_1	-1.879e-03	c_2	-2.095e-04	c_3	0.630
d_1	-6.267e-03	d_2	-2.992e-03		
e_1	-1.352e-04	e_2	3.287e-04		
f_1	6.877e-04	f_2	1.558e-04		

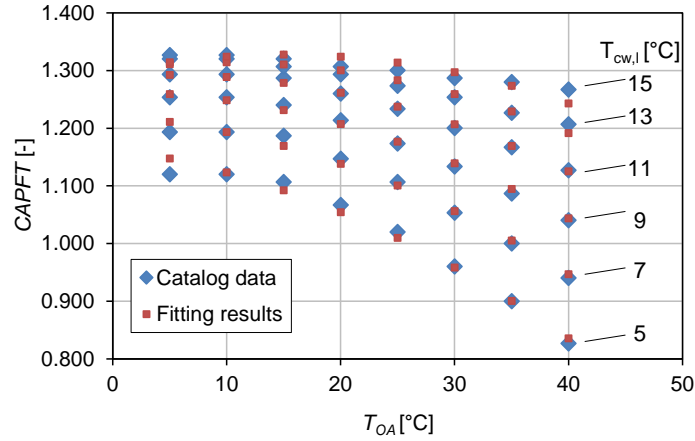


Fig. 7.4.22 冷水出口温度・外気温度能力特性係数 ($CAPFT$) 同定結果

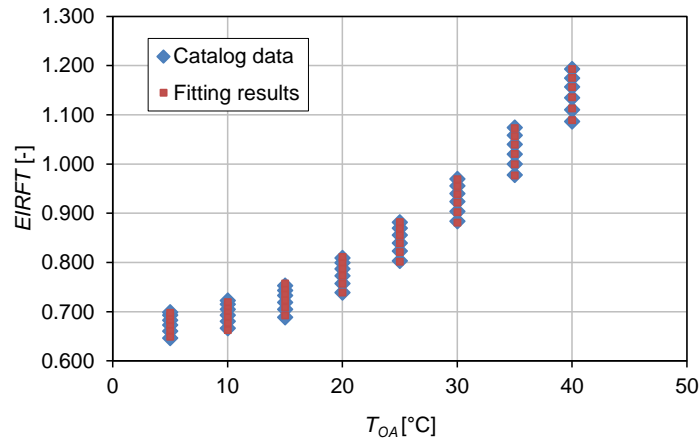


Fig. 7.4.23 冷水出口温度・外気温度消費電力特性係数 ($EIRFT$) 同定結果

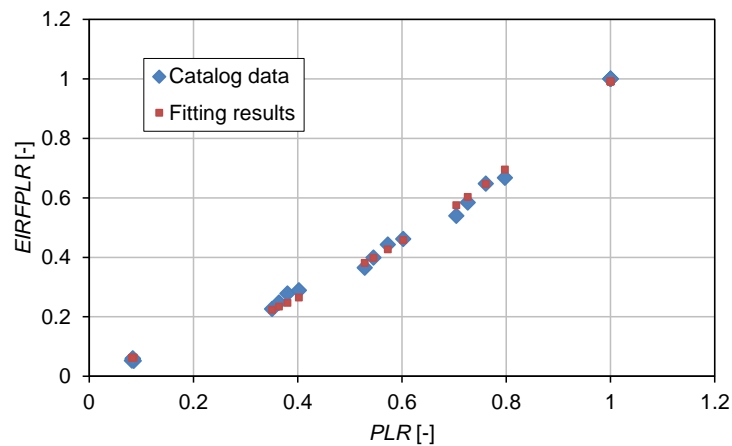


Fig. 7.4.24 部分負荷特性係数 ($EIRFPLR$) 同定結果

7.5 エネルギー消費量計算結果

7.5.1 2次側負荷計算結果

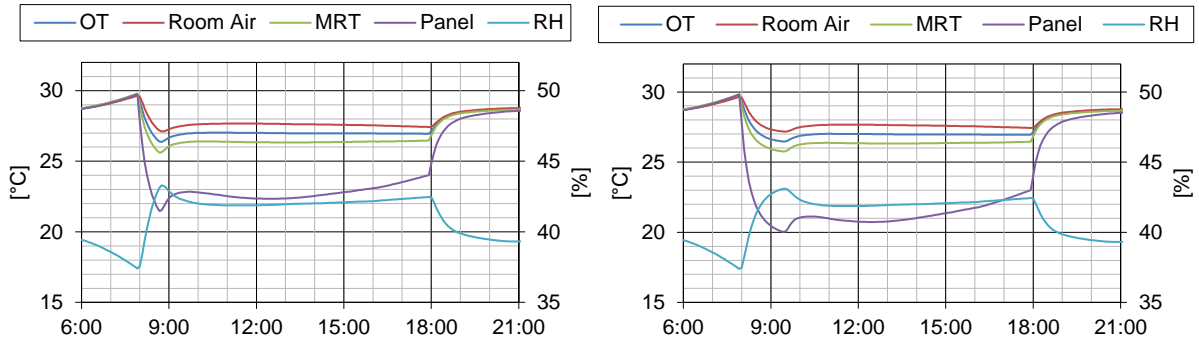
(1) 室内温熱環境

Fig. 7.5.1 に各パターンでの日平均外気温度が最高となる 7/19 の室内温熱環境のシミュレーション結果を示す。各パターンにおいて作用温度 (OT) が設定値 27.0 °C に制御されており、いずれも設定した温熱環境を形成していることが示されている。

天井放射パネル空調のパターン (R80, R60, R40, R40+F) では、平均放射温度 (MRT)、作用温度 (OT)、居室空気温度 (Room Air) が作用温度の設定値 27.0°C の±1.0 °C で推移しており、第 6 章で得られたシミュレーション結果と同様の傾向が得られた。これらの 3 つの要素の順番に着目すると R80, R60 に関しては居室空気温度 (Room Air) が他の 2 つの要素よりも高いが、R40(R40+F) については居室空気温度 (Room Air) が低く、補助顕熱処理設備の負荷処理の割合が影響していると考えられる。パネル表面温度 (Panel) に関しては敷設率が低くなるほど低く制御されており、単位面積当たりの処理熱量が大きくなっている傾向にある。

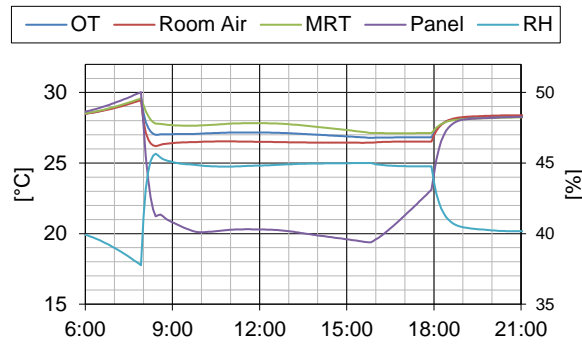
一般空調のパターン (C-Adv, C-Adv+F, C-Gen) では、平均放射温度 (MRT)、作用温度 (OT)、居室空気温度 (Room Air) が作用温度の設定値 27.0°C の±3.0 °C で推移しており、上記と同様に、第 6 章で得られたシミュレーション結果と同様の傾向が得られた。作用温度を天井放射パネル空調と同等に保つには居室空気温度を低くしなければならないことが示されている。

すべてのパターンで相対湿度 (RH) は、40~50% に保たれている。各パターンで相対湿度が異なるが、これは、給気の絶対湿度を設定値 0.006 kg/kg(DA) の一定に保つ制御となっているため、居室空気温度 (Room Air) の計算結果の違いが影響している。

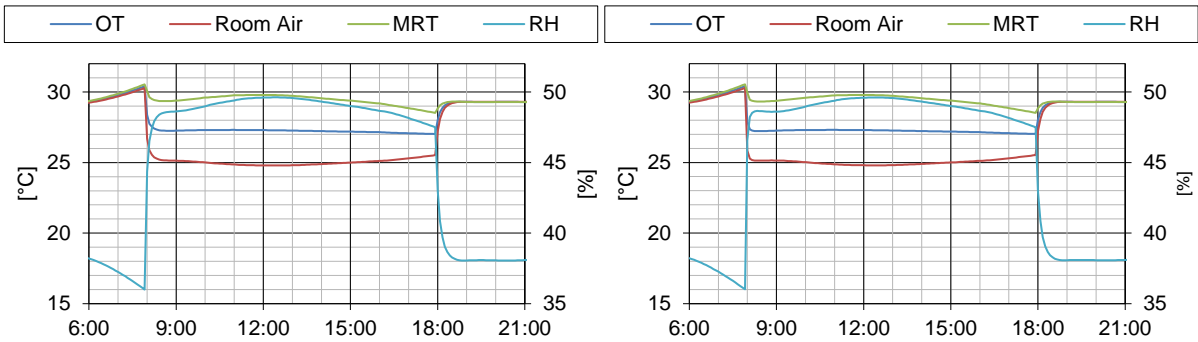


R80

R60



R40, R40+F



C-Adv, C-Adv+F

C-Gen, C-Gen+F

Fig. 7.5.1 室内温熱環境の経時変化 (7/19)

(2) 室内負荷計算結果

Fig. 7.5.2 に各設備機器の制御対象・項目と処理負荷の経時変化の計算結果を示す。

天井放射パネル空調のパターン（R80, R60, R40, R40+F）では，送水温度（Supply water）が負荷に応じて制御されていることが示されている。敷設率が低くなるほど，送水温度が低くなっており，パネル表面温度の経時変化でも明らかのように，単位面積当たりの処理熱量が大きくなっている傾向にある。給気温度（SA）は，R40（R40+F）のほうが，R80 と R60 に比べて低くなっており，補助顕熱処理設備の負荷処理が大きくなっている。

一般空調のパターン（C-Adv, C-Adv+F, C-Gen）では，給気温度，負荷の経時変化がほぼ同一の結果となっている。

すべてのパターンでの，負荷の経時変化に着目すると，立上りの負荷が天井放射パネル空調のほうが一般空調よりも大きくなる傾向にあり，一般的に示されている傾向（天井放射空調は空調の立上りなど応答性が低い）と一致する。

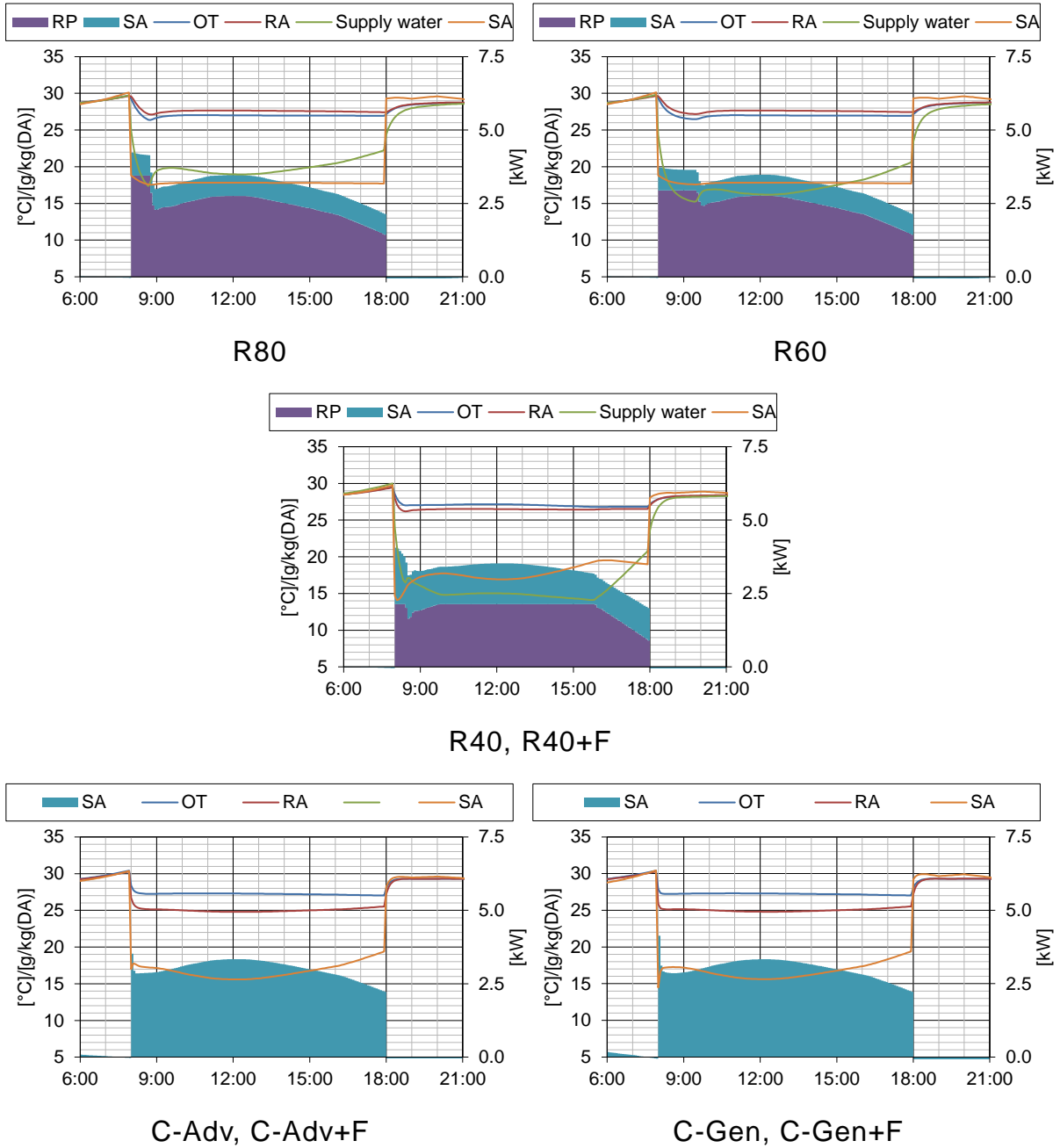


Fig. 7.5.2 各設備機器の制御対象・項目と処理負荷の経時変化 (7/19)

第7章 設計手法の提案と省エネルギー性能の評価

(3) 外気処理システム温度

Fig. 7.5.3 に外気処理システムの各部の温度の経時変化の計算結果を示す。

熱交換器を組み込んだ外気処理システムのパターン (R80, R60, R40, C-Adv) では、給気 (SA) が還気温度 (RA) と除湿コイル出口 (CC outlet) の中間の値になっており、顕熱交換器の効果が考慮できていることが示されている。また、除湿コイル入口 (CC inlet) が給気 (SA) と外気 (OA) の中間の値になっており、全熱交換器の効果が考慮できていることが示されている。

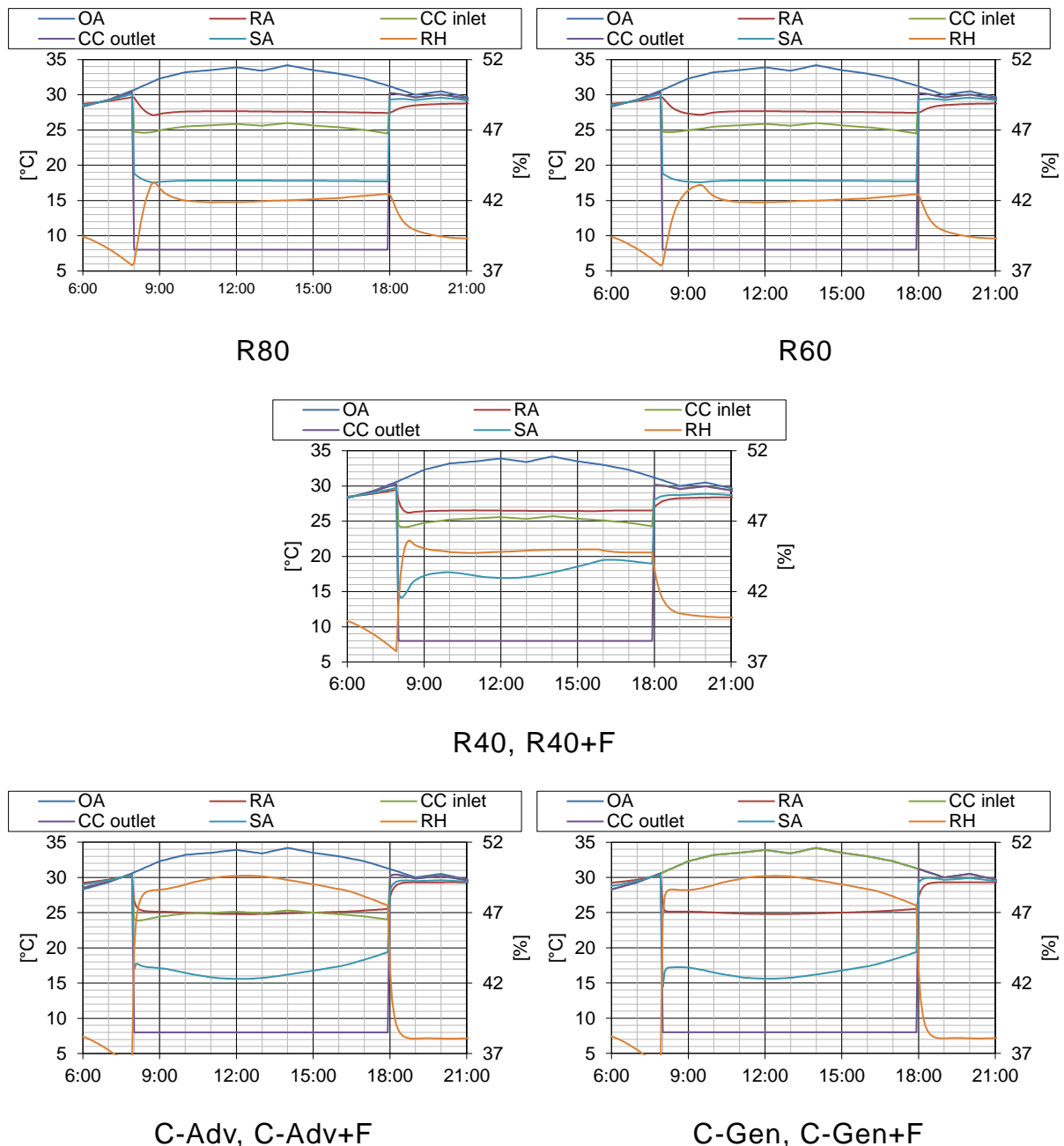


Fig. 7.5.3 外気処理システムの各部空気温度の経時変化 (7/19)

(4) 外気処理システムのコイル負荷計算結果

Fig. 7.5.4 に外気処理システムの冷却コイルの負荷と給気温度，居室空気温度，外気温度・絶対湿度の経時変化を示す。コイル負荷に関して，R80，R60 については，除湿冷却コイルのみの負荷であり，顕熱負荷（Sensible）と潜熱負荷（Latent）に分けて表記している。また，R40，C-Adv 及び C-Gen については，除湿冷却コイル及び顕熱コイルの負荷があり，除湿冷却コイルの顕熱負荷（S1）と潜熱負荷（L1），顕熱コイル（S2）に分けて表記している。R40+F，C-Adv+F のファンコイルユニットの負荷は S2 に該当する。

すべてのパターンにおいて，外気絶対湿度（OH）の経時変化に合わせて，除湿冷却コイル負荷（Sensible と Latent, S1 と L1）が変動していることが分かる。R80，R60，R40，C-Adv については C-Gen よりも除湿冷却コイルの負荷が小さく，全熱交換器と顕熱交換器の効果が熱回路網計算により考慮できている。

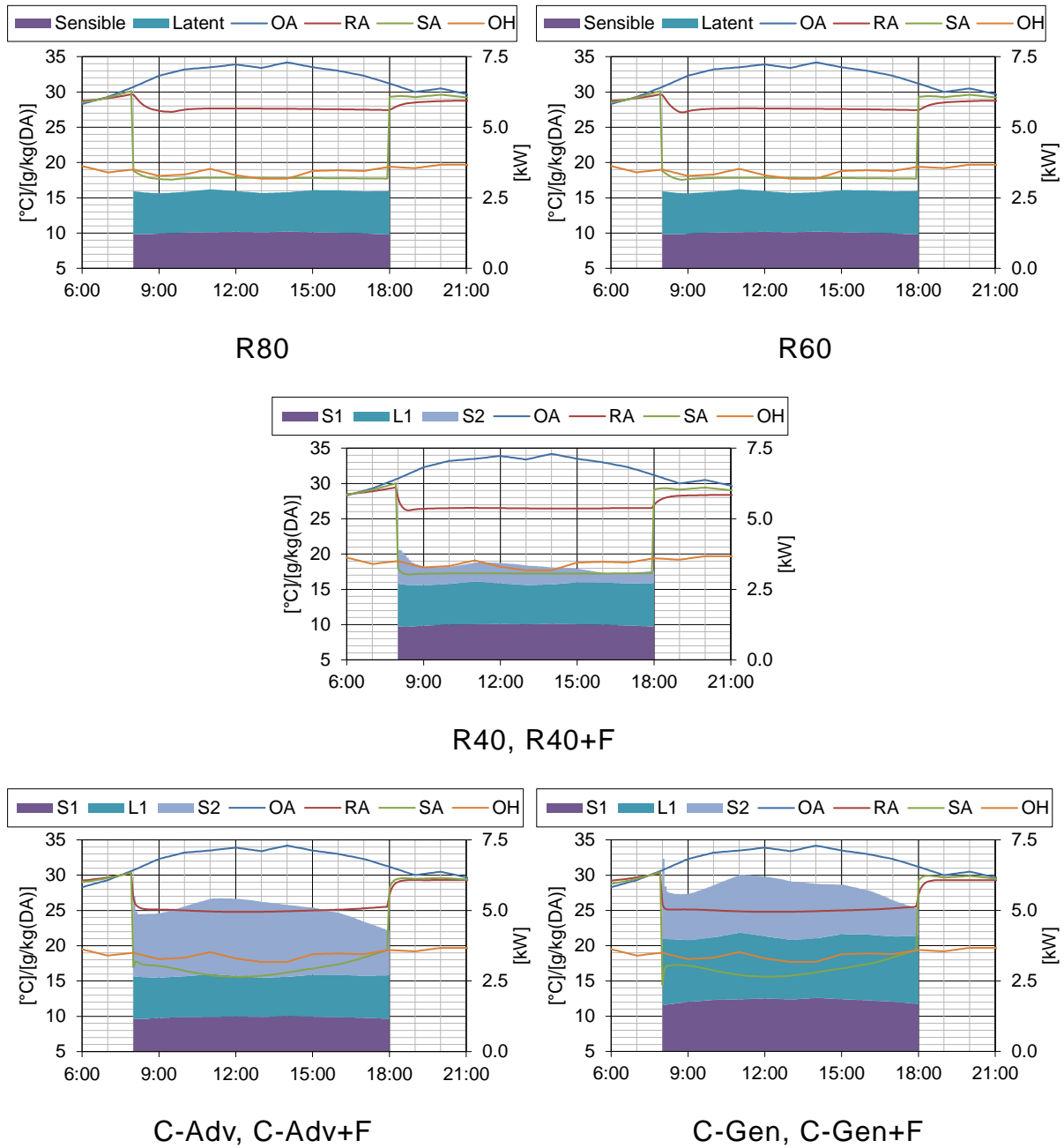


Fig. 7.5.4 外気処理システムのコイル負荷及び各部空気温度の経時変化 (7/19)

(5) 2次側熱回路網計算結果まとめ

それぞれの計算結果より、制御の設定、全熱交換器、顕熱交換器の効果の考慮が適切に行われていることを確認した。

7.5.2 負荷計算結果の比較

Fig. 7.5.5 に各パターンでの放射パネル、コイルの月間 (June, July, August, September) と夏期 (Summer) の積算処理熱量のシミュレーション結果を示す。

室内負荷 (Recool coil, Radiant Panel) と外気処理負荷 (Dehumidify coil Sensible, Dehumidify coil Latent) の合計値に関して、一般空調方式において、熱交換器を用いたほう (C-Adv) が、用いない場合 (C-Gen) よりも 8%程度小さい。

外気処理システムが同じ場合、天井放射空調 (R80, R60, R40) のほうが一般空調 (C-Adv) よりも 2~3%程度大きい。第6章において、天井裏空間の冷却が起因して負荷が、一般空調方式よりも天井放射パネル空調のほうが大きくなる結果を得ているが、同様の結果が得られた。

天井放射パネル空調においては、天井放射パネルの敷設率 40% (R40) としたほうで負荷が大きくなる結果となった。7.4 の設計フローの試行の際に R40 において、パネル天井裏負荷のパネル負荷に対する比率が大きくなる傾向にあった。一方で、パネル居室負荷とパネル負荷の比率 (居室負荷率) が小さくなるほど、天井放射パネルの処理熱量が大きくなることが第4章において示されている。これらの影響により R40 で負荷が大きくなったと考えられる。天井放射パネルの敷設率や補助顕熱処理設備との負荷配分の考え方などの整理が必要と考えられる。

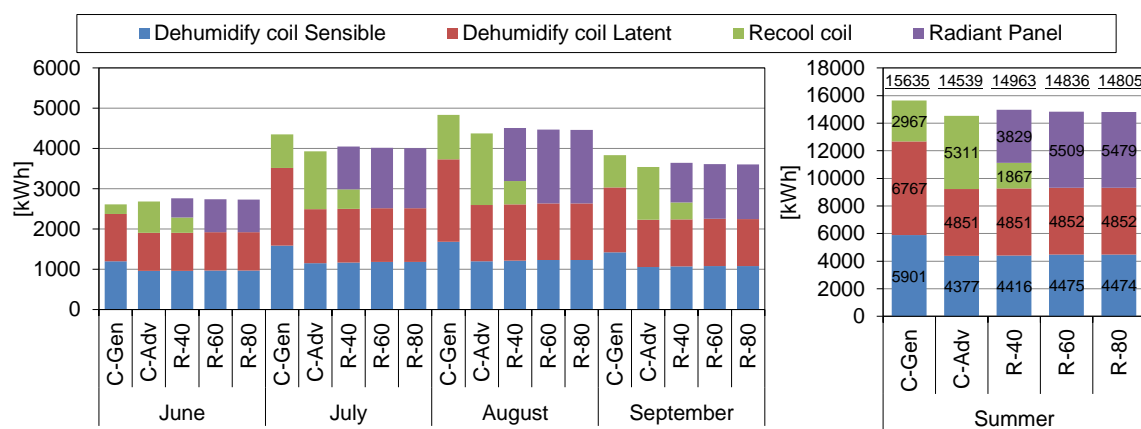


Fig. 7.5.5 負荷計算結果の比較

7.5.3 エネルギー消費量計算結果

Fig. 7.5.6, Fig. 7.5.7 及び Fig. 7.5.8 にそれぞれ高顕熱型熱源の定格 COP を 3.0, 4.0 及び 5.0 としたときの各機器の電力消費量の月間 (June, July, August, September) と夏期 (Summer) のシミュレーション結果を示す。シミュレーションパターンの各棒グラフの上には、各期間での、熱交換器を組み込んでいない外気処理システムのパターン (C-Gen) との差の比率を示している。ここでは、この比率を削減率と称する。以下、「削減」については、特記がない限り、C-Gen に対する「削減」とする。

天井放射パネル空調に関しては敷設率 60% (R60) と 80% (R60) において電力消費量に顕著な差は見られない。敷設率を 40% (R40, R40+F) とすると補助顕熱処理設備追加により、空気搬送動力が大きくなるため、他の天井放射空調のパターンと比べて、電力消費量が大きくなる。

一般空調に関しては、熱交換器を組み込んだ外気処理システムで室内の空調を兼用するシステム (C-Adv) のほうが、他のシステム (C-Gen, C-Adv+F) より全体の電力消費量が大きくなる結果となった。これは熱交換器により送風機の圧力損失が大きくなることが影響している。外気処理システムに熱交換器を組み込む場合、送風機への圧力損失の増大による空気搬送動力の増加と外気負荷減による熱源動力の削減とのトレードオフを考慮に入れて、設計を行う必要がある。

熱源の COP 別に各計算結果を比較すると、高顕熱型熱源の定格 COP が高いほうが、削減率が高い。これにより、潜熱顕熱分離空調システムを設計する際に、室内顕熱負荷を処理するための熱源 (高顕熱型熱源) と除湿を行うための熱源 (通常熱源) の仕様を適正に選定を行わないと、省エネルギー性能を発揮することができないことが分かる。

〈以下、高顕熱型熱源の定格 COP:5.0 とした場合 (Fig. 7.5.8) に関する考察について述べる。〉

天井放射空調のパターンにおいては、空気搬送動力 (Fan Supply, Fan Exhaust) の削減が、電力消費量の削減に寄与している。

R-40 と R-40+F を比較すると、削減率はそれぞれ-17%と-22%となっており、補助顕熱処理設備の空気搬送機器の設計の影響でこのような差になった。天井放射パネルの敷設率を減らして、補助顕熱処理設備により負荷を処理する場合において、空気搬送機器の設計が肝要になることを示している。

C-Adv+F と天井放射空調のパターン (R-40, R-40+F, R60, R80) と比較すると削減率は-19%となっており、天井放射空調のパターンの削減率に匹敵する結果となった。これより、室内の顕熱負荷をなるべく負荷に近いところで処理することで、省エネルギーを図るのに有効であることを示している。ただし、空気搬送による負荷処理を行う場合、制気口の付近と制気口から遠いところの空気温度差など、均質な環境が得られないことなどが考えられ、省エネルギーの観点のみだけではなく、熱流体解析などを用いた検討を行うなど、快適性の観点などにも着目した比較が必要である。

敷設率を低くした場合において、削減率が小さくなる傾向を示したが、今回の計算パターンは建築仕様が一つの条件に絞った検討となっており、より一般

第 7 章 設計手法の提案と省エネルギー性能の評価

性の高い傾向を把握するためには、建築仕様との関係にも着目した検討が必要である。

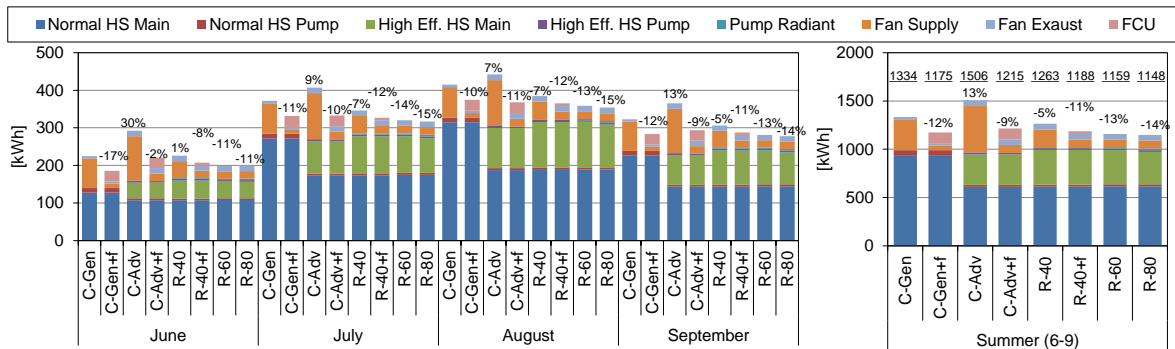


Fig. 7.5.6 エネルギー消費量計算結果の比較（高顕熱熱源定格 COP=3.0）

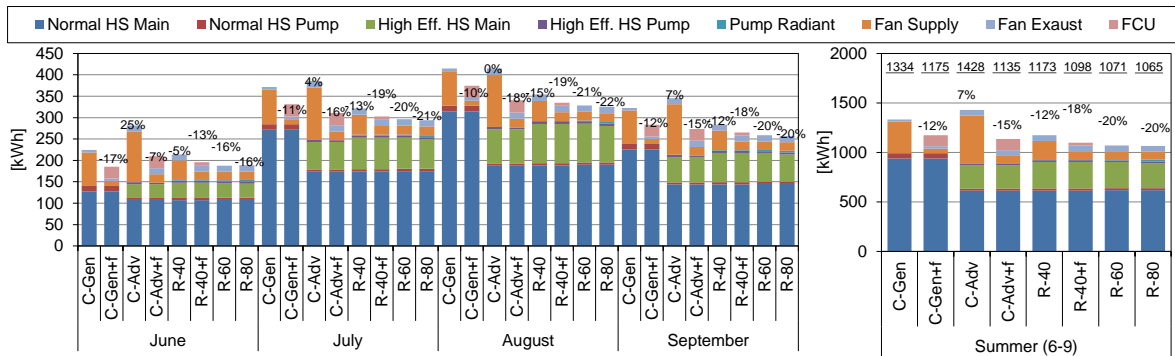


Fig. 7.5.7 エネルギー消費量計算結果の比較（高顕熱熱源定格 COP=4.0）

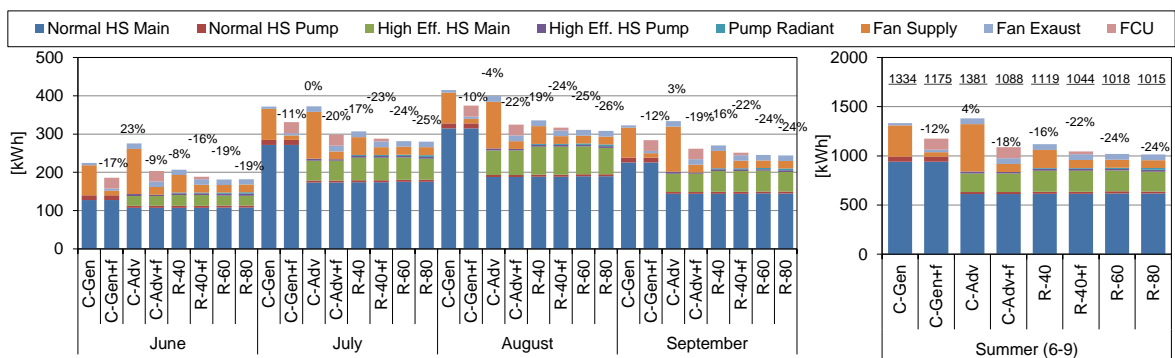


Fig. 7.5.8 エネルギー消費量計算結果の比較（高顕熱熱源定格 COP=5.0）

7.6 まとめ

放射パネルの敷設条件や外気処理システムを考慮に入れた天井放射パネル空調の設備仕様を決定するためのフローを提案し、ケーススタディにより試行した。試行により得られた設備仕様から天井放射空調システムを構成する機器の選定を行い、設計した空調システムの省エネルギー性能の評価を行った。以下にそれぞれで得られた知見を示す。

① 天井放射パネル空調の熱負荷特性を踏まえた設計フローの提案

天井裏の影響、パネルの種類、パネルの設置条件から天井放射パネル空調システムを適正な設備仕様で設計できるフローの提案を行った。ここで天井放射パネル空調に即した負荷計算方法を設計フローに組み込んだ。さらに、外気処理システムを含めた空調システムの設計フローとした。

② 設計フローの試行

提案した設計フローと従来の方法により決定した設備仕様の比較を行い、提案設計フローにより、天井放射パネル空調を適正な設備仕様で設計が可能であることを示した。

③ 省エネルギー評価のための手法の提案とケーススタディ

提案した設計フローから設計したシステムの省エネルギー性能の評価を行い、省エネルギー性能を確保するための天井放射パネルの設置条件、設計の在り方を明確化した。特に放射パネルの敷設率の低い条件において、電力消費量が大きくなる傾向があり、補助顕熱処理設備の空気搬送の設計が重要であることが示された。

変数定義

$q_{s,OHU}$: 供給外気処理顕熱量	[W]
ρ_a	: 空気密度	[kg/m ³]
c_a	: 空気比熱	[J/kg·K]
Q_{sa}	: 外気供給風量	[m ³ /s]
θ_{ra}	: 居室空気温度	[°C]
θ_{sa}	: 供給外気給気温度	[°C]
OT	: 作用温度	[°C]
MRT	: 平均放射温度	[°C]
m	: 水分発生量	[kg/s]
LH	: 潜熱負荷	[W]
c_v	: 水蒸気の低圧比熱	[J/kgK]
r_0	: 蒸発潜熱	[J/kg]
X_{sa}	: 供給外気絶対湿度	[kg/kg(DA)]
X_{ra}	: 室内絶対湿度	[kg/kg(DA)]
P_{pump}	: ポンプ消費電力	[W]
ρ	: 水の比重 (=1000)	[kg/m ³]
g	: 重力加速度 (=9.8)	[m/s ²]
Q_w	: ポンプ流量	[l/min]
H_{pump}	: ポンプ揚程	[m]

η_P :	ポンプ効率 (70%)	[-]
P_{Fan} :	ファン消費電力	[W]
Q_A :	ファン風量	[m ³ /h]
P_T :	ファン静圧	[Pa]
η_F :	ファン効率 (60%)	[-]
$P_{Chiller}$:	熱源消費電力	[W]
Q_{ref} :	熱源定格能力	[W]
COP_{ref} :	熱源定格効率	[-]
$CAPFT$:	冷水出口温度・外気温度能力特性係数	[-]
$EIRFT$:	冷水出口温度・外気温度消費電力特性係数	[-]
$EIRFPLR$:	部分負荷特性係数	[-]
$T_{cw, l}$:	熱源冷水出口温度	[°C]
T_{OA} :	外気温度	[°C]
Q_{avail} :	熱源基準能力	[W]
PLR :	部分負荷率	[-]

参考文献

- 1) 「建築設備設計基準 平成 27 年度版」, 国土交通省大臣官房官庁営繕部設備・環境課監修.
- 2) ASHRAE: ASHRAE Handbook HVAC Systems and Equipment SI edition, Ch. 6 Panel Heating and Cooling, 2016.
- 3) ISO 18566-3: Building environment design. Design, test methods and control of hydronic radiant heating and cooling panel systems. Part 3: Design of ceiling mounted radiant panels. International Organization for Standardization, Geneva, 2017.
- 4) F. Bauman, J. Feng, S. Schiavon: Cooling Load Calculations For Radiant Systems, ASHRAE Journal, pp. 20-27, 2013.12
- 5) 鈴木 雄介, 武政 祐一, 塩谷 正樹, 加藤 正宏, 二階堂 稔, D-32 自然エネルギー利用天井放射冷暖房システムに関する研究 : (第 1 報)天井放射冷暖房システムの実測結果及び性能評価モデルの精度検証, 空気調和・衛生工学会大会 学術講演論文集, pp.1135-1138, 2010.9
- 6) 久木田 亮子, 中村 元, H-53 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. 9
- 7) 塩谷 正樹, 郡 公子, 天井放射パネルユニット熱性能と室内環境の汎用的な計算法に関する検討, 日本建築学会環境系論文集, 第 79 巻 第 698 号, pp. 331-338, 2014.4
- 8) 塩谷 正樹, 郡 公子, スリットを有する天井放射空調のための汎用熱計算法の検証と冷房解析, 日本建築学会技術報告集, 第 20 巻 第 45 号, pp. 633-636, 2014.6
- 9) 松本若菜, 森 太郎, 羽山広文, 菊田弘輝: 建築物総合シミュレーションツ

第7章 設計手法の提案と省エネルギー性能の評価

- ールを用いた天井放射冷房システムの設計法の検討, 日本建築学会環境系
論文集 第80巻 第707号, pp.21-28, 2015.1
- 10) Milorad Bojic, Dragan Cvetkovic, Ljubisa Bojic: Decreasing energy use and influence to environment by radiant panel heating using different energy sources, Applied Energy, Volume 138, pp. 404-413, 2015
 - 11) Franc Sodec: Economic viability of cooling ceiling systems, Energy and Buildings, Volume 30, Issue 2, pp. 195-201, 1999
 - 12) ASHRAE Standard 140-2011, Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs. Atlanta, GA: ASHRAE, 2011.
 - 13) Eleftherios Bourdakis, Ongun B. Kazanci, Bjarne W. Olesen: Load Calculations of Radiant Cooling Systems for Sizing the Plant, Energy Procedia, Volume 78, pp. 2639-2644, 2015
 - 14) ASHRAE Standard 55-2017, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta, GA: ASHRAE, 2017.
 - 15) EN 14240: Ventilation for buildings – Chilled ceilings – Testing and rating, European Committee for Standardization, 2004.
 - 16) H. Okuyama, Thermal and airflow network simulation program NETS, Proceedings of the 6th International IBPSA Conference (Building Simulation '99), Kyoto, Japan, pp. 1237–44, 1999
 - 17) ASHRAE Standard 140-2011, Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs. Atlanta, GA: ASHRAE, 2011.
 - 18) 気象データシステム：拡張アメダス気象データ, 2013.4
 - 19) Jae-Weon Jeong,: Designing a Dedicated Outdoor Air System with Ceiling Radiant Cooling Panel System, ASHRAE Journal Oct., 2006
 - 20) US Department of Energy: EnergyPlus Engineering Reference, Sep., 2014.
 - 21) 空気調和・衛生工学会：G 1008-2016 建物エネルギーシミュレーションツールの評価手法に関するガイドライン, 2016. 3

第8章 おわりに

第8章 おわりに

8.1 本論文で得られた成果

天井放射空調の設計手法の確立に向けて、本研究で取り組んだ課題とその成果を下記にまとめる。

I. 天井放射パネルの処理熱負荷と性能に及ぼす敷設条件の影響の明確化

- 様々な敷設条件での天井放射パネルの冷却能力検証実験を行い、給気条件、天井の開口条件、負荷位置、試験室の大きさ、天井条件の違いにより、天井放射パネルの冷却能力が変化することを示した。
- 様々な形状の天井放射パネルの冷却能力検証実験や実建物における冷却能力検証を行い、対流熱伝達を促進する形状とすることで、冷却能力が向上することを示した。
- インテリアパネルやペリメータチルドビームの冷却能力について実績データの分析を行い、実験で得られた能力回帰直線上に冷却能力の実績値が一致することを示した。これより、能力把握方法として本論文の実験方法が妥当であることを示した。
- 運転実績データの分析を行い、バルブの開度や室内環境の応答性に関する基礎的なデータを得た。制御のハンチングなどの課題が示された。

II. 天井放射パネルの敷設条件を考慮可能とする工学モデルの構築

- 天井放射パネル熱収支モデルの提案を行い、天井放射パネル空調の温熱環境や天井放射パネルの冷却能力を予測するためには、(A)居室、(B)天井裏空間、(C)天井放射パネルの居室側表面、(D)天井放射パネル天井裏側表面、(E)天井放射パネル配管内冷水の5種類の熱収支を解く必要があることを示した。
- 天井放射パネル空調の熱収支構造の解明のために、天井放射パネル放熱特性検証実験を行い、天井裏と居室の負荷比率により天井放射パネルが処理可能な負荷が変化すること、天井放射パネルにより冷却された天井裏の空気が居室側の負荷処理に寄与することを示した。これにより、天井放射パネル表面での熱収支だけではなく、天井放射パネルを覆う空間全体での熱収支を考慮する必要性が示され、熱収支モデルの妥当性を証明した。
- 天井放射空調熱収支モデルにおける伝熱係数の同定方法を提示し、同定方法の検証を行った。これにより、天井放射パネル放熱特性検証実験と同様の実験を行うことで、実験で用いた放射パネル以外でもこの方法が適用可能であり、一般化が可能であることを示した。
- 実大実験のデータを用いて伝熱係数の同定を試み、実験結果を再現できることを示した。これにより、天井放射パネル空調熱収支モデルを用いることで、冷却能力に及ぼす敷設条件の影響を考慮することが可能であることを示した。

III. 敷設条件を入力条件とした天井放射パネルの性能の予測手法の構築

- 天井放射パネル空調熱収支モデルにおける各変数、各定数の設計段階での位置づけを明確化し、設計仕様を決定する際に有用な情報を提示すること

ができる天井放射パネル空調性能予測手法を提案した。

- 天井放射パネル空調性能予測手法を用いて、設計仕様を決定する際に有用な情報を提示することが可能な能力線図を導出し、その活用方法について示した。これにより、設計を行う際の天井放射パネル空調性能予測手法の有用であることを示した。

IV. 敷設条件を考慮した天井放射パネルへの熱負荷の計算手法の構築

- 天井放射パネル空調熱収支モデルを応用し、天井放射空調に即した熱負荷計算手法を提案した。
- 天井放射空調の熱負荷に建築仕様が及ぼす影響に関して考察を行った。これにより、天井裏の影響により一般対流式空調よりも熱負荷が大きくなることを示した。これにより天井裏空間の考慮の重要性を示した。また、熱容量を大きくすることが天井放射パネル空調の立ち上がりの負荷削減や非空調時の温度上昇の抑制に効果があることを示した。

V. 天井放射パネルの性能及び熱負荷計算手法を用いた設計手法の構築

- 天井放射パネル空調の熱負荷特性を考慮に入れた熱負荷計算と天井放射パネル空調性能予測手法を組み込んだ、天井放射パネル空調設備仕様決定フローを提案した。
- 天井放射空調設備仕様決定フローを設備設計のフローの中に組み込み、外気処理システムを含めた、総合的な設計が行えるフローを提案した。
- 提案した設計フローと従来の方法により決定した設備仕様の比較を行い、提案設計フローにより、天井放射パネル空調を適正な設備仕様で設計が可能であることを示した。

VI. 設計した天井放射パネル空調のエネルギー消費量計算手法の構築

- 熱回路網モデルによる天井放射パネル空調と外気処理システムを考慮した2次側の負荷計算手法を示した。これを用いることで、省エネルギー性能の把握を可能とした。
- 実際に設計した天井放射空調システムの省エネルギー性能評価を行い、省エネルギー性能を確保するための天井放射パネルの設置条件、設計の在り方を明確化した。特に天井放射パネルの敷設率の低い条件において、電力消費量が大きくなる傾向があり、補助顕熱処理設備の空気搬送の設計が重要であることを示した。

8.2 本論文の課題

下記に本論文の課題を示す。

(1) 他の放射空調方式の検討

本論文での「天井放射パネル空調」は、下記の定義の放射空調を対象としてきた。

- ・ 表面温度： 低温式（15～25℃）
- ・ 放射面位置：天井面
- ・ 熱媒： 水
- ・ 放射方式： パネル方式（裏面の断熱材なし）
- ・ 結露有無： 結露非許容

建築デザインにおいてより汎用的な放射空調の適用を考えると第1章の分類で示した他の方式に関する検討が必要である。また、今後の一般事務所や住宅での暖房に関するニーズも考えられることから、暖房に対する検討も必要と考えられる。本論文で示した天井放射パネル空調熱収支モデルをより一般化し、他の放射空調方式に対する汎用性を高める必要があると考えられる。

(2) 空気搬送システムの天井放射パネルの性能への影響に関する検討

天井放射パネルに関する冷却能力検証実験や放熱特性検証基礎実験において、敷設条件の影響を検証した。多様化する建築デザインにおいて、本論文で検証対象とした敷設条件の代表性に関して議論の余地がある。とりわけ空気搬送システムにおける給気口や還気口の位置の影響に関しては、空気の経路で天井放射パネルの冷却能力が変化することが示されており、検討が必要である。

(3) 新たな天井放射パネルの開発への対応

今後、天井放射パネルを新たに開発していくことが、建築デザインとの関係や低価格化への対応などのために必要と考えられる。パネルの開発の際にあたって、形状に関するスタディにおいて、その形状と性能の関係を検討しながら、試行錯誤をしていく。天井放射パネル空調熱収支モデルを用いることで、形状が単純なパネルに関しては冷却能力の予測が可能である。ただし、形状が複雑なパネルに関しては、パネルの表面の空間への放射と対流の熱伝達現象が複雑で、モデル化が困難であり、この課題への対応が必要である。

(4) 温熱環境分布予測への対応

天井放射パネル空調性能予測手法を用いることで、天井放射パネルの冷却能力、ある条件でのパネル表面温度分布などが予測可能であり、設計の際に有用な情報を提示することが可能である。ただし、ここで注意しなければならないのは、天井放射パネルと熱交換する空気や居室表面の温度は分布のない様な空間であることを仮定していることである。建築空間内において、温熱環境は分布を伴っており、設計に際して、快適性の評価を行うために温熱環境分布の予測が重要な検討項目となる。温熱環境の予測に関しては、本論文では検討項目の対象外としていた。天井放射パネル空調の快適性の評価を行うためには、

今後検討が必要である。

(5) 建物規模・建築デザインとの関係に関する検討

本研究においては、単室モデルによる基礎的検討にとどまっている。今後は、建物規模での検討が必要と考えられる。その際には、以下の点に着目する必要があると考えられる。

- ① 上階の影響に関する検討
- ② 天井放射パネル空調のあるべき建築仕様の検討

①に関しては、本論文のケーススタディにおいて、天井放射パネルの上部は屋根となっており、天井裏の影響が大きくなりやすい条件での検討となっていた。より一般的な知見を得るためには、一般オフィスビルのように、上階の影響が小さい建物についても、検討が必要である。これに関連して、本論文において天井放射パネルの裏面を断熱しないものを主な研究の対象としてきたが、天井放射パネルの裏面の断熱の有無と建築仕様がどのように負荷特性に影響を及ぼすかも、今後のパネルの選定に際して、必要な検討項目と考えられる。

②に関しては、本論文において熱負荷特性の把握においてケーススタディの検討の対象としてきたのは、熱容量、断熱性能、日除けの有無であった。建築仕様は他にも、日除けの種類、ガラスの日射遮蔽性能や気密性などがあり、それぞれの建築仕様の条件が及ぼす影響の把握が必要である。これにより、天井放射パネル空調の設計にあたっての建築デザインの指針を示す必要がある。

(6) 最新省エネルギー技術とのシステム構築の検討

本研究においては、特定のシステムに限定した検討を行った。ただし、様々な省エネルギー技術があり、建物全体での省エネルギーを実現するためには、それぞれの最適な組み合わせを検討する必要がある。例えば、下記が考えられる。

- ① デシカント空調機
- ② 地中熱利用システム
- ③ フリークーリングシステム

①に関しては、本論文では設備システム構築の複雑さから、省エネルギー性能に関しては、検討の対象外とした。ヒートポンプの排熱利用などが考えられ、システムとして設計をどのように行っていくかが、課題となる。

②、③に関しては、天井放射パネル空調は冷水温度を高めることが可能であり、その効用を最大限に利用するためには、自然エネルギーを活用した熱源システムについても検討が必要である。

(7) 制御・運用のあり方について

本研究においては、制御・運用のあり方などは検討の対象としていなかった。適用建物における実測から、制御の設定によって、流量が安定しないなどの問題点が明らかになっている。今後は、最適な制御・運用方法の確立のためにも、制御対象の選定、放射パネルと給気の制御のバランスの確保などに課題があると考えられる。

8.3 展望

以下に前項で示した課題に対する展望を示す。

(1) 他の放射空調方式の検討

(2) 空気搬送システムの天井放射パネルの性能への影響に関する検討

(3) 新たな天井放射パネルの開発への対応

(4) 温熱環境分布予測への対応

天井放射パネル空調熱収支モデルを組み込んだ熱流体解析（CFD）を行うことで、これらの課題に対して検討が可能であると考えられる。水式の放射空調システムにおいて、CFDでの冷水配管のモデル化は計算負荷の制約で困難であった。天井放射パネル空調熱収支モデルにより、冷水とパネル表面との熱移動をマクロ的に解き、パネル表面と居室空間の表面や空気との熱伝達をCFDにより詳細に解くことで、精度の高い計算が行えると考えられる。これにより、放射面位置、空気搬送システムによる強制的な空気移動の影響、複雑なパネル形状の考慮、パネル表面温度分布を考慮に入れた温熱環境分布の予測に応用が可能であると考えられる。

(5) 建物規模・建築デザインとの関係に関する検討

単室モデルでの熱回路網解析を拡張して、建物規模での熱回路網解析を行うことで、この課題に対して検討が可能である。設計実務において適用を考えると、モデルの生成がポイントとなるが、BIMとの連携などにより、省力化が図れば、設計実務への応用が可能となり、より実用的な検討が行えると考えられる。

(6) 最新省エネルギー技術とのシステム構築の検討

(7) 制御・運用方法の検討

本論文において示した熱回路網モデルによる2次側の負荷計算方法をさらに拡張させ、設備システムとの連成解析を行うことで、これらの課題に対応が可能であると考えられる。

項目	成果	課題	展望
<p>I. 冷却能力と性能に及ぼす敷設条件の影響の明確化</p>	<p>様々な敷設条件・パネル形状の影響を定量化</p>	<p>他の方式の検討 (上部断熱有・躯体埋込式など) 給気・還気口の配置の影響の検討</p>	<p>天井放射パネル空調 熱収支モデルを組み込んだCFD解析により検討が可能</p>
<p>II. 敷設条件を考慮可能とする工学モデルの構築</p>	<p>5つの熱収支式を主軸とした敷設条件の影響の考慮が可能なモデルを構築</p>	<p>新たな天井放射パネルの開発への対応</p>	
<p>III. 性能予測手法の構築</p>	<p>設計に資する予測手法を構築</p>	<p>温熱環境分布予測への対応</p>	
<p>IV. 熱負荷計算手法の構築</p> <p>V. 設計手法の構築</p>	<p>一般空調との熱負荷特性の違いの明確化 天井裏の影響の考慮の重要性を提示 適正な仕様で設計可能な設計フローを提案</p>	<p>建物規模での検討 建築デザインとの関係に関する検討</p>	<p>規模を大きくした建物モデルによるケーススタディの実施</p>
<p>VI. 省エネルギー性能評価</p>	<p>補助顕熱処理設備の搬送動力設計の重要性を提示</p>	<p>最新省エネルギー技術とのシステム構築の検討 制御・運用方法の検討</p>	<p>システムシミュレーションによるケーススタディの実施</p>

Fig 8.2.1 本論文の成果と課題・展望

論文目録

論文目録

本論文に関する既発表論文を下記に示す。

1. 査読付き論文（筆頭著者）

- 1) 伊藤 清, 川島 実, 荒井 義人, 高橋 満博, 村上 宏次, 野部 達夫: ペリメータにチルドビームを配置した天井放射空調システムの冷却性能検証, 日本建築学会環境系論文集, 第 81 巻, 第 723 号, pp. 447-455, 2016.5
- 2) Sei Ito, Yasunori Akashi, Jongyeon Lim: Study on Thermal Load Calculation for Ceiling Radiant Cooling Panel System, Proceedings of 15 th International Conference of IBPSA, pp. 224-232, 2017.8
- 3) 伊藤 清, 赤司 泰義, 林 鍾衍, 三浦 靖弘, 川村 聡宏: 天井放射パネル空調性能予測手法の提案, 日本建築学会環境系論文集, 第 83 巻, 第 751 号, 2018.9

2. 査読無し論文（国際会議発表論文含む）（筆頭著者）

- 1) 伊藤清, 荒井義人, 鈴木道哉, 村上宏次, 高橋満博, 野部達夫: 天井放射空調システムの検討 その 3 対流促進型放射パネルを設けたシステムの検討, 空気調和・衛生工学会大会 学術講演論文集 pp. 2097-2100, 2011.9
- 2) 伊藤清, 荒井義人, 高橋満博, 村上宏次, 川島実, 野部達夫: ZEB を目指した都市型超高層オフィスビルの研究 (第 2 報) 放射空調の計画概要及び能力実測, 空気調和・衛生工学会大会 学術講演論文集 pp.97-100, 2013.9
- 3) 伊藤 清, 川島 実, 荒井 義人, 高橋 満博, 村上 宏次: 天井放射空調に関する検討 その 3 天井の開口条件による放射天井パネルの冷却能力への影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 1345-1346, 2016.8
- 4) 伊藤 清, 赤司 泰義, 三浦 靖弘, 川村 聡宏: 天井放射空調のモデル化に関する研究 (第 2 報) 天井放射パネル空調性能の簡易予測手法の構築, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp. 313-316, 2016.8
- 5) 伊藤 清, 赤司 泰義, 林 鍾衍: 天井放射空調システムの熱負荷特性に関する研究—建築仕様の及ぼす影響についての考察—, 第 51 回空気調和・冷凍連合講演会講演論文集, pp. 173-176, 2017.4
- 6) 伊藤清, 高橋満博, 堤裕樹, 三宅絵美香, 村上宏次: 対流強化型天井放射パネルの開発 その 3 放射パネル放熱特性分析, 日本建築学会大会学術講演梗概集 環境工学Ⅱ pp.983-984, 2017.8
- 7) 伊藤 清, 高橋満博, 堤 裕樹, 村上宏次: テナントオフィスビル向け対流強化型天井放射パネルの開発 (第 2 報) 放熱特性分析と敷設状況を考慮した放射パネル能力予測チャートの提案, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp. 309-312, 2017.9
- 8) 伊藤 清, 赤司 泰義, 林 鍾衍, 尾島 慧亮: 天井放射パネル空調の省エネルギー性能に関する検討, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 2018.9

3. 査読無し論文（国際会議発表論文含む）（筆頭著者以外）

- 1) 高橋満博, 伊藤清, 雨宮沙耶, 荒井義人, 村上宏次, 野部達夫: ZEB を目指した都市型超高層オフィスビルの研究 (第 11 報) 放射天井パネルの放熱

-
- 特性分析, 空気調和・衛生工学会大会 学術講演論文集 pp. 181-184, 2014.9
- 2) 大西 由哲, 伊藤 清, 三浦 靖弘, 川村 聡宏: 天井放射空調のモデル化に関する研究 (第1報) 基礎実験の概要と実験結果, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp. 309-312, 2016.8
 - 3) 堤 裕樹, 高橋満博, 伊藤清, 三宅絵美香, 村上宏次: 対流強化型天井放射パネルの開発 その1 開発経緯と能力検証実験計画, 日本建築学会大会学術講演梗概集 環境工学Ⅱ pp.979-980, 2017.8
 - 4) 三宅絵美香, 高橋満博, 伊藤清, 堤 裕樹, 村上宏次: 「対流強化型天井放射パネルの開発 その2 温熱環境測定結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集 環境工学Ⅱ pp. 981-982, 2017.8
 - 5) 堤 裕樹, 高橋満博, 伊藤清, 村上宏次: テナントオフィスビル向け対流強化型天井放射パネルの開発 (第1報) 適用建物概要と能力検証実験, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp. 305-308, 2017.9
 - 6) 尾島慧亮, 伊藤清, 赤司泰義, 林鍾衍: 放射パネルの敷設条件を考慮した天井放射空調の設備仕様決定フローと熱負荷, 日本建築学会大会学術講演梗概集 環境工学Ⅱ, pp.1063-1066, 2018.9

謝辭

謝辞

本論文は、筆者が2006年に清水建設株式会社に入社して以来、13年間の天井放射パネル空調に関する研究・開発、2016年4月から東京大学大学院工学系研究科 建築学専攻 赤司研究室にて3年間の博士課程での研究の成果をまとめたものである。ここに本論文での研究活動をご指導・ご支援いただいた方々に謝意を表し、本論文の結びとしたい。

京都大学名誉教授 吉田治典先生には、筆者が京都大学在籍時に卒業論文・修士論文の指導をいただきました。先生の省エネルギー・地球環境問題への志の高さに惹かれ、筆者は建築環境工学の門を叩きました。修士課程の熱心なご指導の下、研究の手ほどきをいただきました。修士課程修了後も委員会活動を通して、シミュレーションに関してご指導いただきました。これは本論文のシミュレーションに関わる部分の基礎となっております。

工学院大学教授 野部達夫先生には、天井放射パネル空調の研究・開発、実建物における性能検証を行うにあたって、ご指導をいただきました。清水建設において天井放射パネル空調に関して何も知見がないなかで、天井放射パネル空調のあるべき姿をご提示いただきました。これにより、実建物へ天井放射パネル空調の適用を実現することができました。

東京大学教授 赤司泰義先生には、指導教官として本論文の研究を進めるにあたってご指導をいただきました。博士課程当初、天井放射パネル空調の熱負荷計算方法のあるべき姿の問いかけをいただき、どのように研究を進めていくか、思い悩むことがありましたが、これが発端となって本論文を完遂することができました。また、大学の研究室に在籍するという得難い経験をいただき、研究の楽しさ・醍醐味の再認識させていただきました。

東京大学教授 大岡龍三先生には、副査としてご指導をいただきました。定期的な駒場での打ち合わせでいただいた適確なアドバイスは、研究を進めるにあたっての指針となりました。

芝浦工業大学教授 秋元孝之先生には、副査としてご指導いただきました。天井放射パネル空調の設計手法の検討に当たって、システムとして総合的に捉えることの重要性を気付くきっかけをいただきました。

東京大学教授 平手小太郎先生には、副査としてご指導いただきました。先生の適確なアドバイスにより、本論文の位置づけを明確化することができました。

東京大学准教授 前真之先生には、副査としてご指導いただきました。先生のアドバイスにより、今後の研究の発展につながるヒントをいただきました。

東京大学助教 林鍾衍先生には、赤司研究室 室内環境班の一員として、ご指導いただきました。先生の正鵠を射たアドバイスにより、研究の完成度を高めることができました。

東京大学 赤司研究室 修士1年 尾島慧亮君には、第7章の設計フローに関する研究を担っていただきました。これにより、筆者の拙い指導にもかかわらず、第7章の設計フローの完成にたどりつくことができました。

東京大学 赤司研究室の皆様には、様々な面で刺激をいただきました。皆様の研究に対する姿勢・ひたむきさに触れ、初心に還ることができました。皆様のご支援により、3年間の研究室生活が楽しいものになりました。

清水建設の皆様には、実験方法や工学モデルの構築方法、エンジニア・研究者のプロフェッショナルとしての基本的な姿勢をご指導いただきました。研究者として未熟者であった筆者が、本論文の研究を完遂できましたのも、皆様のご指導あつての賜物です。

父・紘一，母・周，妻・友子には，日ごろの育児，家事の面でのサポートをいただきました。また，娘たち志帆，咲希は，研究に行き詰ったときの心の支えとなっておりました。本論文での研究に邁進できたのも，皆様のご支援があったからこそ成り立つものです。

皆様のご支援・ご指導の賜物で完遂した本論文を一つのステップとして，更なる建築環境工学の発展に貢献してまいりたいと思います。

ありがとうございました。