

放射空調方式の開発

*** (第4報) 室内気流解析による性能評価 ***

○北川 晃一、斎藤 俊彦、土井 隆司、菰田 紀子

(株) 東芝、住空間システム技術研究所

Development of Radiant Air-conditioning Systems

(4th Report: Performance Analysis by CFD)

○Koichi KITAGAWA, Toshihiko SAITO, Takashi DOI and Noriko KOMODA

TOSHIBA Corp., Airconditioners and Appliances Engineering Laboratory

Radiant Air temperature distributions, created by radiant air-conditioning systems, depend on not only buoyancy effect but reciprocal radiant heat exchange effect on each indoor wall. Thus housing performance concerning insulation and ventilation is closely connected with the indoor thermal environment of radiant air-conditioning systems. A numerical simulation has an important role to develop reliable systems, because experimental studies show difficulties in various housing conditions.

We compared three different types of air-conditioning systems (a ceiling type of convective unit, a ceiling radiant panel and a combined system, which was composed of a radiant panel and a larger area of convective air flow inlet) in the modeling room. We selected operating conditions for these air-conditioning systems to keep the same level of SET* in the occupied zone in different housing insulation performances. The combined system was confirmed to be superior to other systems to create a more comfortable thermal environment with a smaller amount of energy consumption.

1. はじめに

室内の温熱環境は、空気温度、気流速、湿度、放射、人間の代謝量と着衣量の6因子に大きな影響を受けることはよく知られている。室内環境を快適に空調するためには、空気温度を主体に制御することが最も一般的に行われているが、放射環境を積極的に制御することにより、快適性・省エネルギー性に優れた冷暖房方式を開発することが期待されている。

たとえば、放射式暖房を従来の対流式暖房と比較すると、より低い室温でよいこと、温度分布が小さくなること、熱源温度と室内温度の温度差を小さくでき冷凍サイクルのCOPが向上すること、大風量の送風機を必要としないことなどから省エネルギー性に優れるとともに、気流がほとんど生じないために気流による不快感もない、理想的な冷暖房方式と考えられる⁽¹⁾。

放射環境は、放射パネルだけでなく周囲壁との相互放射により実現されるために、建物の断熱性と密接な関係がある。そのために、躯体の蓄熱性を利用した連続空調を前提としたシステムが多いが、住宅での使用を考えるとユーザが間欠運転を行うことが一般的であり、また冷房のためには除湿機能が必要である。そこで、立ち上げ性能に優れた対流式を併用できる放射空

調方式が有望なシステムと考えられる。

その一例として、Fig.1に示すような冷暖房システムを試作し、実験的な評価検討を進めている。本システムでは、暖房においては、室内熱交換器により暖められた空気を天井裏のダクトに流し放射パネルを暖め、室内を放射効果により暖房するとともに、その空気を大きな面積を有する吹き出し口から微風速で吹き出し室内を暖房する。冷房においても同様に、室内熱交換器で除湿及び冷却された空気により放射パネルを冷却するとともに、室内を微風速で吹き出した対流も用いて冷房する。また、早く目標環境に近づくように、立ち上げ時には従来と同様の対流式システムとして運転し、ダンパーにて室内方向から放射ダクトに送風を変更して、定常状態に近づく放射主体のシステムに移行するものである。

建物特性・冷凍サイクル特性を考慮したうえで、体系的な開発を効率的に進めるためには、非定常を含めた室内気流解析システムを構築することが必要となる。本論文では、その基本となる定常解析において、解析の安定性について検討し、対流式、放射パネル、及び両者の併用方式の暖房運転について解析した結果をまとめ報告する。

第20回 人間-生活環境系シンポジウム (福岡 1996年12月)

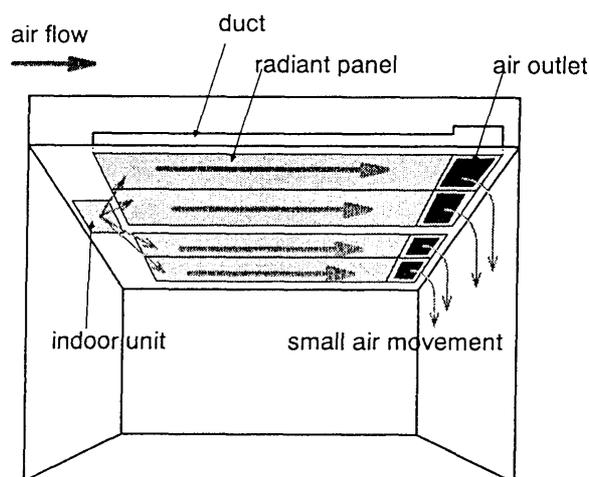


Fig.1 Radiant and convective air-conditioning system

2. 定常解析手法の概要

今回は、大西らが開発した解析手法 Heat Balance Methods(HBM コード)^{(2)~(5)}をベースとして、改良を加えたものを使用した。以下、解析手法の概略を説明する。

1) 壁面熱バランス方程式

建物の断熱特性を考慮し、室内の放射場と対流場を正確に求めるために、(1)式の熱バランス方程式を用いて、内壁面温度分布を求めながら、室内熱気流場を解くのが、HBM コードの最大の特徴である。

$$Q_c + Q_r + Q_l + Q_p = 0 \quad (1)$$

ただし、

Q_c : 室内空気と壁体内表面の対流熱流束
($= \alpha_c (t_a - t_w)$)

Q_r : 壁体内表面相互放射熱交換による熱流束
($= \epsilon \sigma (T_{mrt}^4 - (t_w + 273)^4)$)

Q_l : 外気温度と壁体内表面の伝導熱流束
($= R_w (t_o - t_w)$)

Q_p : 放射パネルの放熱量

α_c : 壁体内表面における対流熱伝達率

t_a : 室内空気温度

t_w : 内壁面表面温度

ϵ : 内壁面の放射率

σ : Stefan Boltzmann 係数

T_{mrt} : 内壁面の平均放射温度 (絶対温度)

R_w : 外壁表面の熱伝達を含めた壁体の熱抵抗

t_o : 外気温度

2) 熱対流解析アルゴリズム

標準 $k-\epsilon$ モデルを用いて乱流近似を行った定常の支配方程式 (浮力項は Boussinesq 近似採用) を、

SIMPLE 法 (Semi-Implicit Methods for Pressure Linked Equations)⁽⁶⁾ のアルゴリズムを用いて計算する。今回の計算では、対流項の差分スキームには一次精度の風上差分を用いた。

HBM コードでは、粗い分割の放射解析メッシュと細かい分割の流体解析メッシュを使用し、両者間のデータは線形補間にて参照する形式を採用している。これは、壁体間の形態係数から放射環境を評価するために必要なメッシュ分割は、流体解析に比べて粗くてもよく、放射メッシュが細くなると形態係数の記憶メモリー量が急激に増加することを考慮したものである。

形態係数の算出には、放射熱線法のアルゴリズムを使用している。壁体の相互放射熱交換を考慮し、壁面相互の熱吸収を考慮した Gebhart の吸収係数を求め、壁面の平均放射温度 T_{mrt} を算出した。

3) 快適性評価

室内気流解析により求めた空気温度、気流、放射温度分布から、温熱環境の快適性を比較分析するために、温冷感を評価する指標として新標準有効温度 SET* (Standard New Effective Temperature)⁽⁷⁾ と PMV (Predicted Mean Vote)⁽⁸⁾、気流による不快感を評価する指標として PD (Percentage of Dissatisfied)⁽⁹⁾ を求めた。ここで、SET* 及び PMV は、室内の評価点 (流体メッシュの解析点) において微小球を想定して平均放射温度を求めたうえで、標準的な条件として代謝量 1.2met、着衣量 1.0clo、相対湿度 50% を設定して算出した。

4) 壁体内表面の熱伝達率 α_c の評価

(1)式において、壁体内表面の熱伝達率 α_c をどのように評価するかが、解析結果の精度と計算の収束性に大きく影響を持つ。 α_c の算出方法として、各壁体で一定値を与える、壁関数で評価するほかに、層流及び乱流による平行平板熱伝達率の評価、空調学会の大空間の空調負荷解析における評価モデル⁽¹⁰⁾ 等数種のモデルを使用できるようにし、その収束性、温度レベルについて比較検討した。

3. 解析結果

1) 解析条件

今回は、Fig.2 に示す、床面積約 30m² の部屋にて、天井カセット型の対流式エアコン、天井放射パネル、Fig.1 のような放射パネルと対流吹き出しの併用システムについて、暖房運転した場合について解析し、その室内環境を比較分析した。

ここで、各壁体の断熱性能としては、換気負荷も含めた空調負荷に相当するように換算した数値 (床面積

第 20 回 人間—生活環境系シンポジウム (福岡 1996 年 12 月)

基準で換算すると、約 $2.5\text{W/m}^2\text{deg}$) を使用している。各壁体は、ガラス窓がある 2 面を外壁、その他の面を内壁とし、外気温度を 2°C 、内壁側 (天井裏、床下を含む) の空気温度を 12°C として、解析した。

居住空間を、ASHRAE55-92⁽¹¹⁾ にしたがって、床面から高さ 1.8m 以内で、壁から 0.6m 以上離れた空間として定義した。各システムにおいて、居住空間内の SET* の平均温度が 24°C となるように、空調機の吹き出し

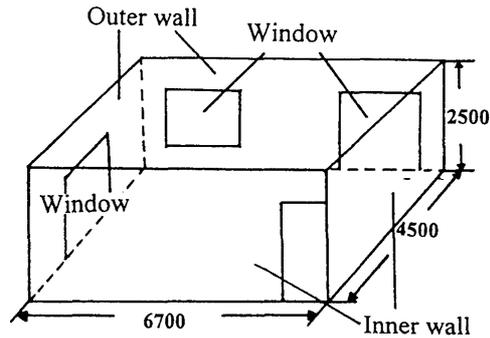


Fig. 2 Computed Modelling Room

し温度、風量の運転条件を設定して解析した。その解析条件及び結果を Table 1 に示す。また、室内の中央断面における空気温度、SET*、PMV、PD の分布を Fig. 3~5 に示す。

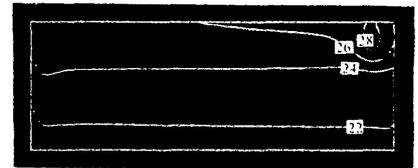
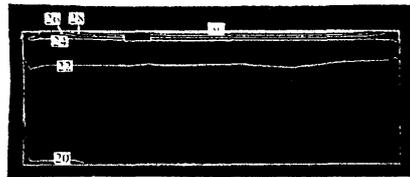
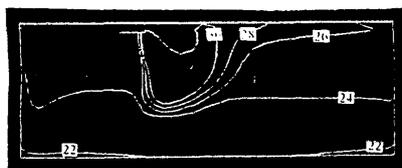
解析においては、放射パネルの場合には、乱流解析を行うとパネルの大きさや発熱量などの条件により、パネル近傍で乱流エネルギー量 k 、乱流エネルギー散逸率 ϵ がトリガーとなって発散することがあったため、層流モデルにて解析を行った。ただし、内壁面の熱伝達率 α_c は層流平行平板モデルにより評価した。対流エアコン、併用システムの場合には、 $k-\epsilon$ モデルを用いた乱流解析を行い、壁関数により α_c を評価した。層流解析で初期の流れ場を形成した後、乱流解析に切り替えることで、安定的に解析できた。

Table 1 に示した快適域の体積割合は、下記条件を満たす空間が居住空間に占める体積割合として定義した。

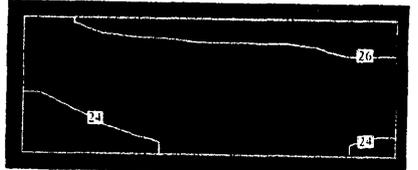
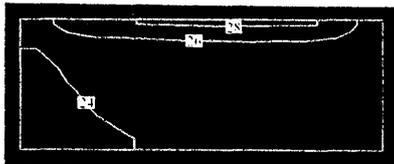
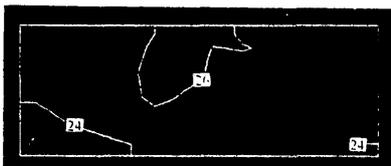
$$22.3 < \text{SET}^* < 25.4$$

$$-0.5 < \text{PMV} < 0.5$$

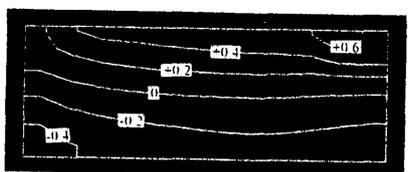
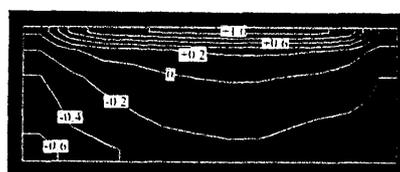
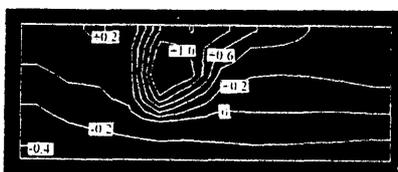
$$\text{PD} < 15$$



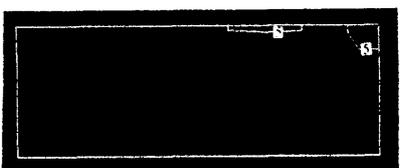
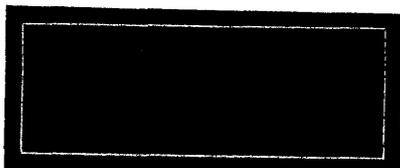
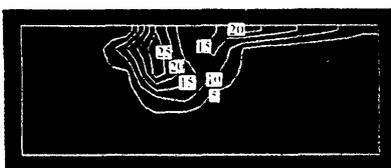
Distributions of Air Temperature



Distributions of Standard New Effective Temperature (SET*)



Distribution of Predicted Mean Vote (PMV)



Distributions of Percentage of Dissatisfied (PD)

Fig. 3 Convective System

Fig. 4 Radiant Panel System

Fig. 5 Combined System

第20回 人間-生活環境系シンポジウム (福岡 1996年12月)

Table 1 Analysis Conditions and Results

Air-Conditioning System		Ceiling-Type Convective Unit	Ceiling Radiant Panel	Combined System
Outdoor Temp.	(°C)		2.0	
Area of Panel	(m ²)	/	19.8	19.8
Panel Temp.	(°C)	/	32.0	26.5
Air Flow Rate	(m ³ /h)	250	/	450
Discharge Temp.	(°C)	45.0	/	28.5
Average Temp.	(°C)	24.2	22.0	23.5
Heat Loss	(W)	1595	1762	1653
Heat Loss(excluding panel)	(W)	/	1253	1280
Average in the Occupied Zone	Air Temp. (°C)	23.7	21.4	22.7
	Vertical Temp. Differences (°C)	3.2	1.1	2.7
	PMV	-0.03	-0.21	-0.12
	P D (%)	2.1	0.2	0.2
	Plane Radiant Temp. (Upper) (°C)	22.6	24.0	23.2
	Plane Radiant Temp. (Lower) (°C)	21.2	21.4	21.1
	SET*	24.6	24.4	24.5
Volume Ratio of Comfortable Zone	P D (%)	98.5	100	100
	PMV (%)	98.5	97.8	100
	SET* (%)	93.0	100	100
	PMV and P D (%)	98.0	97.8	100
	SET* and P D (%)	92.5	100	100

2) 室内温熱環境の比較

対流式エアコンと放射パネルの結果を比較すると、居住空間内のSET*を同一レベル(約24.5°C)にするために、空気温度は23.7°Cと21.4°Cと2.3deg高くなっている。これは、放射パネルの放射効果により、放射パネルの方が低い室温で同等の温冷感を得られることを表している。また、対流式では居住域の空気温度分布が大きくなるとともに、吹き出し気流による不快域が居住域の中に見られる。

併用システムは、居住域の空気温度は対流式と放射パネルの中間22.7°Cで同一レベルのSET*の環境を実現している。SET*やPMVの分布は、放射パネル温度が低いことから、放射パネルの場合よりも小さい。また、吹き出し気流速が小さいために、居住域のPDはほとんど5%以内と快適な空間を実現している。

3) 省エネルギー性の比較

まず、壁体からのヒートリーク量について分析する。ヒートリーク量は、放射パネルの温度が高いために放射パネルを使用した場合の方が対流式に比較すると増加している。ここで、放射パネルを完全に断熱してヒートリークをなくすとTable 1に示したように逆に20%程度小さくすることができる。

100mmのグラスウールを用いて断熱した場合を考えると、放射パネルからのヒートリーク量は、放射パネルの場合には509Wから185Wに、併用システムの場合には372Wから135Wに減少することが可能となり、それぞれは1438Wと1415Wなり、併用システムのヒートリーク量が最も小さくなる。

また、室内外の温度差が小さい方が換気負荷が小さくなることから、放射パネルを使用することにより、換気量が増加するとともに、対流式に比べると空調負

荷の増加分が少なく、省エネルギー性は有利となる。

さらに、冷凍サイクルのCOPの観点から比較すると、対流式の場合には45°Cの吹き出し温度であるのに対し、放射パネルは32°C、併用システムでは吹き出し温度28.5°Cとなっており、併用システムが最も熱源温度として低く、最も省エネルギー性に優れている。

4. おわりに

放射式空調システムの開発の一環として、放射を含めた室内温熱環境をCFDにより解析する手法を開発し、放射パネルと対流吹き出しを併用した空調システムが、対流式あるいは放射パネルのみのシステムよりも、快適性・省エネルギー性に優れることを明らかにした。なお、本研究は通商産業省工業技術院のエネルギー使用合理化関係技術実用化開発費補助金を受けて行った研究の一部である。

5. 参考文献

- (1)瀬下ら、空調・衛生講演論文集、p369,(1991).
- (2)Onishi et al., ROOMVENT'92,(1992).
- (3)竹谷ら、空調・衛生講演論文集、p1164,(1990).
- (4)大西ら、空調・衛生論文集、No.58,p23,(1995).
- (5)北川ら、第17回人間-生活環境系シンポジウム講演論文集,p166,(1993).
- (6)Patanker, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere,(1980).
- (7)Gagge et al.,ASHRAE Trans.,Vol.77,p247,(1971).
- (8)Fanger, Thermal Comfort, Danish Press,(1970).
- (9)Fanger et al.,ERGONOMICS Vol.29,p215,(1986).
- (10)空調学会空調設備委員会熱負荷算法小委員会編集、大空間を中心とした最近の熱負荷計算、(1993).
- (11)ASHRAE,ANSI/ASHRAE Standard55-92,(1992).