

対流・放射・湿度輸送と空調システム制御の連成シミュレーション

作用温度一定条件での空調負荷の評価

Cooling Load Analysis through Coupled Simulation of Convection, Radiation and System Control

金 泰 延*・加 藤 信 介**・村 上 周 三*

Taeyeon KIM, Shinsuke KATO and Shuzo MURAKAMI

1. 序

アトリウムのような大空間に開放されている居住空間 (セミオープンスペース) の温熱環境は大空間から大きな影響を受ける。セミオープンスペースはアトリウム空間との間に生ずる空気混合・放射熱交換により大きな空調熱負荷が生じる。このような空間に対して効率的な空調設計を行うためには、設計段階でこの影響等を予め予測しておくことが重要になる。本研究では既存の対流・放射・湿度輸送の連成解析と空調システム制御を結合することにより、人体の作用温度一定の条件での空調熱負荷を精度良く予測するとともにその温熱環境の特性を詳細に解析する^(文1,2)。本報ではセミオープンスペースの空調方式として、除湿型 (結露許容型) 放射パネル冷房方式^(文3)と全空気空調方式の2方式について、エアーカーテンによる遮断効果も含めてその空調熱負荷を人体モデルの作用温度同一条件 (26°C) のもとで解析する。

2. 解析対象 (図1, 表1)

アトリウム (天井高さ 15 m) に接続されるセミオープンスペース。この空間は放射パネル又は全空気方式により冷房される。アトリウム空間は大きな熱容量を持ちセミオープンスペースからの流入熱の影響を受けないものと仮定する。簡単のため、セミオープンスペースは開放される1面を除きアトリウム空間とは熱、気流的に分離されているものとする。放射冷房パネルはアトリウム側の開口部を除く3面に設置する (CASE 1, 3)^(注1)。全空気方式の場合、天井に吹出口 (CASE 2 ; 2個, CASE 4 ; 1個) と吸込口 (2個) を設置する (CASE 2, 4)。アトリウムとの空気混合を最小化するためエアーカーテンを設けた場合も考慮する^(注2)。計算対象の中央に1体の人体モデルを設置し、そ

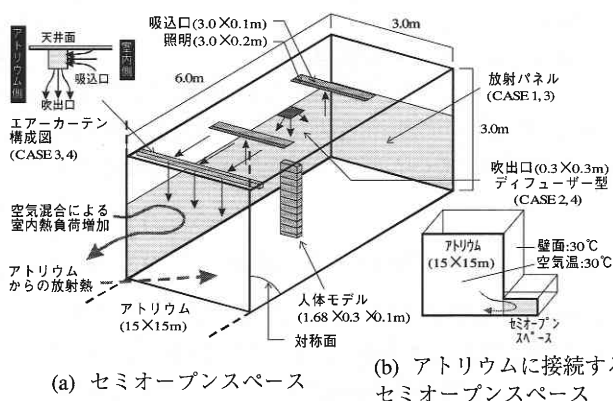


図1 解析対象とセミオープンスペース (計算領域: 対称性を考慮し, 全体の1/2を計算)

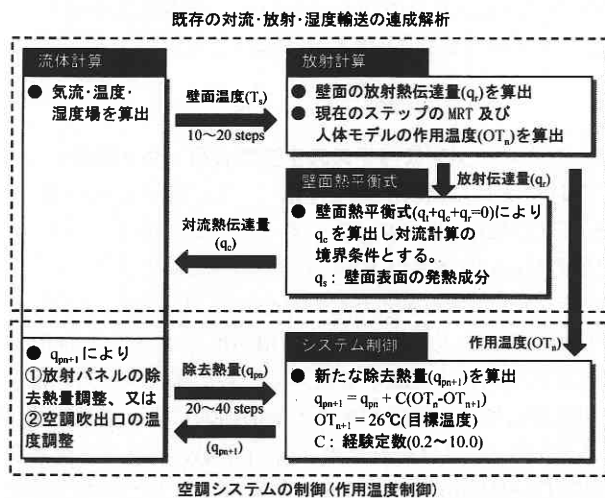


図2 連成シミュレーションの手順

の人体モデルの作用温度が目標温度 (26°C) になるように各空調システムの制御を行う^(注3)。

*東京大学生産技術研究所 第5部
**東京大学生産技術研究所 附属計測技術開発センター

3. 対流・放射・湿度輸送とシステム制御連成シミュレーション

3.1 対流，放射，湿度輸送の解析

対流計算は標準 $k-\epsilon$ に基づく 3 次元解析．放射に関しては，形態係数は Monte Carlo 法により，壁間相互放射熱伝達解析は Gebhart 吸収係数法によって行う．湿度計算は湿度輸送方程式を解く．アトリウムは単純にモデル化され，放射場のみがセミオープンスペースと連成して解析される (注4)．アトリウムとセミオープンスペースが接する面に圧力型の境界条件を与えセミオープンスペースの流れ場を解く．境界条件の詳細は (注5) 参照．

3.2 シミュレーションの手順

図2に連成シミュレーションの手順を示す．放射パネル又は吹出口の投入冷熱量は人体モデルの作用温度が目標温度 (26°C) となるよう計算途中で修正される (注6, 7)．

4. 解析ケース (表2)

CASE 1 は除湿型放射パネル冷房で，CASE 2 は全空気方式冷房の場合．CASE 1, 2 に対し CASE 3, 4 はアトリウムとの境界側の天井面にエアーカーテンを設置．エアーカーテンの吹出温度と湿度はその吸込の温度，湿度と同じとする．又，エアーカーテンを設けない全空気方式の CASE 2 の場合はその分，空調風量を増やし CASE 4 の約 1.8 倍とする (吹出口 2 個設置)．

5. 結 果

5.1 セミオープンスペースの空調熱負荷 (表2参照)

放射パネル冷房方式の CASE 1, 3 の負担顕熱負荷 (それぞれ 1.9, 1.8 KW) はエアーカーテンのある全空気方式の CASE 4 (4.8 KW) の約 40 % である．エアーカーテンのない全空気方式の CASE 2 (9.0 KW) は放射パネル方式に比べ同じ人体作用温度とするには約 5 倍の室内空調投入熱量が必要．又，各空調システムの潜熱負担負荷の場合，放射パネルの表面結露により潜熱を除去する CASE 1, 3 はそれぞれ 1.0, 1.3 KW となり，全空気方式 (CASE 2: 16.8 KW, CASE 4: 8.4 KW) に比べ低い値を示す．

5.2 気流分布 (図3)

(a) CASE 1 (図3-a) アトリウムからの空気は空間上部から入って下部から流出される．放射パネルの近傍では，冷却された空気が下降し，右回りの大きな循環流が生じている．アトリウムとの空気交換量は最も低い

表1 室内熱負荷発生量

	人体モデル	照明	合計
顕熱	0.2	0.4	0.6
潜熱	0.1	0.0	0.1

表2 解析ケース

CASE		1	2	3	4	
セミオープンスペースの顕熱発生量	[KW]	0.6	0.6	0.6	0.6	
セミオープンスペースの潜熱発生量	[KW]	0.1	0.1	0.1	0.1	
人体モデルの作用温度	[°C]	26	26	26	26	
アトリウムとの空気混合による顕熱負荷	[KW]	1.1	8.4	1.0	4.1	
アトリウムとの放射交換による顕熱負荷	[KW]	0.2	0.05	0.2	0.09	
アトリウムとの空気混合による潜熱負荷	[KW]	0.9	16.7	1.2	8.3	
アトリウムとの空気混合量	[m³/h]	931	5990	3370	3660	
アトリウムの条件	温度	[°C]	30	30	30	
	湿度	[%]	60	60	60	
放射パネル	負担顕熱負荷	[KW]	1.9		1.8	
	負担潜熱負荷	[KW]	1.0		1.3	
空調吹出口	温度	[°C]		9.6	8.5	
	湿度	[%]		0	0	
	風量	[m³/h]		1620	なし	907
		[回/h]		30		17
	負担顕熱負荷	[KW]	なし	9.0		4.8
負担潜熱負荷	[KW]		16.8		8.4	
エアーカーテン	風量	[回/h]		なし	60	
	風速	[m/s]			3	
	負担負荷	[KW]			0	
セミオープンスペースの平均温度		[°C]	28.8	25.8	27.7	

(網掛け部分：計算結果より選られたもの)

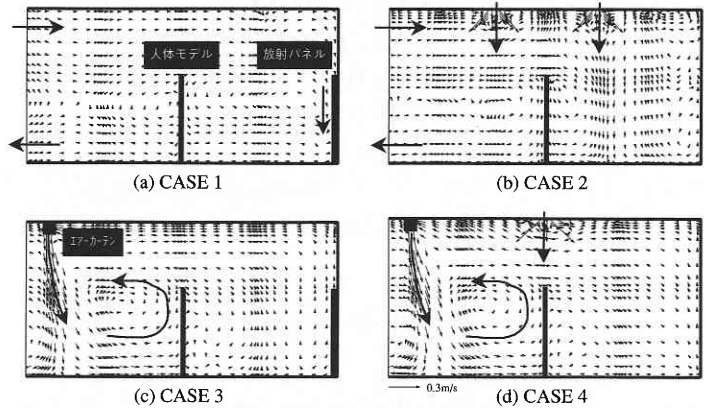


図3 気流分布 (中央断面)

(表2参照)．

- (b) CASE 2 (図3-b) 空調風量が最も多いためアトリウムとの空気交換量も他のケースに比べ大幅増加しておりその分空気交換による熱損失が多い．
- (c) CASE 3 (図3-c) エアーカーテンによる大きい循環流により放射パネル近傍の下降流が消失．又，エアーカーテンにより，アトリウム側の空気が誘引され空気交換量は CASE 1 に比べ 3.6 倍増加する．
- (d) CASE 4 (図3-d) 空調吹出口から吹出された冷気は循環流によってよく混合される．アトリウムとの空

気混合は、CASE 2と比べ40%程度減少しエアーカーテンの効果が認められた。

5.3. 温度分布 (図4)

- (a) CASE 1 (図4-a) 空間全体で温度成層が生じ、上下温度差が約4~5°C程度となっている。室平均温度は28.8°C程度で他のケースと比べ高い。但し、人体への作用温度 (OT_n) はいずれのケースも26°Cに等しく設定されている。
- (b) CASE 2 (図4-b) 空調冷気が直接下降している室内の奥側は22~24°CとなりCASE 1に比べ低い。室平均温度は25.8°C。
- (c) CASE 3 (図4-c) エアーカーテンにより室内空気がよく混合され均一な温度分布となる。室平均温度はCASE 1に比べ多少低い。
- (d) CASE 4 (図4-d) アトリウムとの空気交換の減少により室平均温度は24.3°C程度と最も低い温度を示す。室内空気はCASE 3と同じく良く混合し均一な温度場となっている。

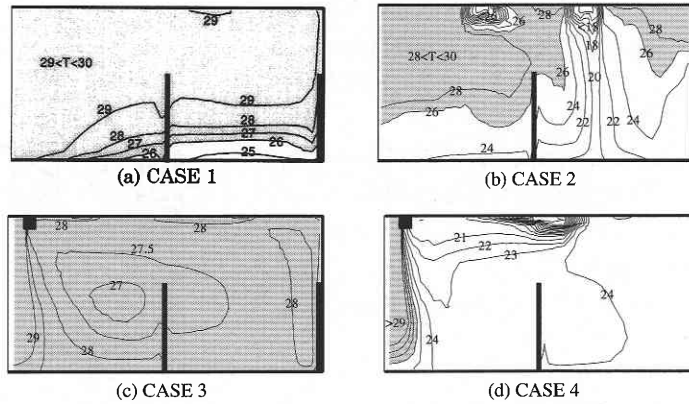


図4 温度分布 (中央断面)

5.4 相対湿度 (図5)

- (a) CASE 1 (図5-a) 全領域で60%を超える値を示す。放射パネルによる冷気の下降流のある床近傍では高い湿度の領域が生じている。室内の奥側では温度の場合と同様湿度の成層が生じている。
- (b) CASE 2 (図5-b) アトリウム側は殆ど60%の値を示すが、室内の奥側は空調吹出口の影響により多少低い湿度の領域が生じている。空調システムが負担する潜熱量 (16.8 KW) が多く、最も低い湿度分布を示している。
- (c) CASE 3 (図5-c) エアーカーテンによる空気混合によりCASE 1でみられた湿度の成層が消失している。人体モデル付近では65%を越える高い湿度を示している。又、当然のことながら放射パネル近傍でも高い値を示す。
- (d) CASE 4 (図5-d) 空間全体で相対湿度60%前後の均一な湿度場になっている。

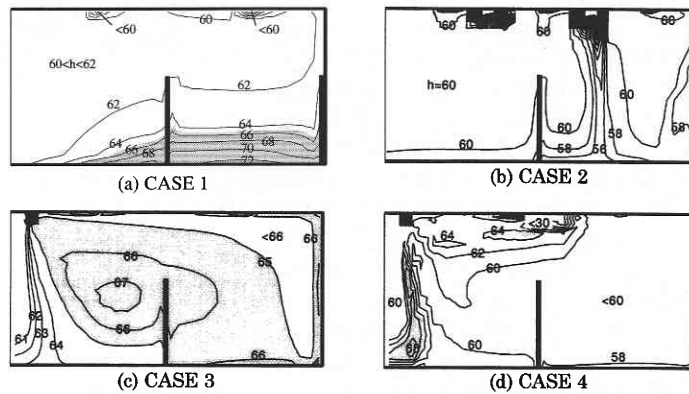


図5 相対湿度分布 (中央断面)

5.5 壁面の表面温度分布と人体モデルのMRT (図6)

- (a) CASE 1 (図6-a) 全空気方式のCASE 2, 4と比べ室温は相対的に高いが人体モデルのMRTは24.6°Cと低い。放射パネルの平均表面温度は14.4°C。放射パネルとの形態係数が大きい床面と天井面は放射パネルによる放射による吸熱により全空気方式のCASE 2より多少低い温度を示す。
- (b) CASE 2 (図6-b) MRTは28.1°CでCASE 1より高い値を示す。天井面の温度はアトリウム空気温と同じ30°C程度となる。床面は空調冷気が下降するため多

- 少低くなり26~28°C程度の温度分布を示す。
- (c) CASE 3 (図6-c) 放射パネル平均表面温度はCASE 1と比べ0.2°C程度低くなっているが床面温度が多少高くなっているためMRTは0.3°C程度高い。
- (d) CASE 4 (図6-d) エアーカーテンによりアトリウムからの空気が遮断され、天井面の温度はCASE 2より4°C程度低くなる。その分MRTも多少低くなる。

5.6 人体モデルの放熱特性 (図7)

放射パネル方式のCASE 1, 3の場合、人体モデルの放射による放熱量が対流と比べ約4倍となる。又、放射パネルは人体発熱量 (55 W) の約50%を吸収している。全空気方式のCASE 2, 4の場合、対流による放熱量が放射によるものより約2倍となっている。

6. ま と め

- (1) 対流・放射・空調制御シミュレーションにより人体への作用温度を一定とする条件で各種空調方式の熱負荷 (室内空調投入熱量) を算出した。
- (1) 空気の入りが自由であるオープンスペースの場合、

研究速報

放射温度を調整する放射パネル方式は空気混合による熱損失が少なく省エネルギー的環境制御法となる。

- (1) 全空気方式により空調を行う場合、当然のことであるがエアーカーテンは熱損失を小さくするために有効となる。

(1998年10月19日受理)

注

(1) 単板型放射パネルを仮定。(2) 今回は多少粗いメッシュで計算したため、エアーカーテンの噴流は経験式よりやや早く減衰する結果となった。より細かいメッシュで計算すれば改善されると思われる。(3) 全空気方式の場合、空調風量を固定し吹出空気温度を制御する方式としてシミュレーションを行った。(4) アトリウムの空気温度と壁面温度は今回は便宜的に30°Cとする。アトリウム空気の相対湿度は60%，放射率は0.9 (5) ① 圧力境界条件: アトリウム側に静圧0固定, (流入): 乱流エネルギー $k_{in} = 3/2 (U_{in} \times 0.05)^2$, 散逸率 $\epsilon_{in} = C_\mu k_{in}^{3/2} / l_{in}$, 長さスケール $l_{in} =$ 流入口の幅 (3m), 温度 $T_{in} = 30^\circ\text{C}$, (流出) free slip. ② 吹出口: 圧力境界条件の流入と同じ。③ 壁面: (速度) 一般化代数則, 対称面は free slip. (温度) 対流伝達率 α_c ($\text{W}/\text{m}^2\text{C}$) 固定 (放射パネル: 5.5, 断熱面: 3.0, 他: 4.0). (湿度) 人体の湿度発生率は固定. 放射パネルは (注7) 参照. 湿度伝達率 α' ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ (kg/kg)) はルイス関係により求める ($a' = 0.001\alpha_c$). 他の壁面は断湿。④ 放射率: 壁面, 人体: 0.9, 対称面: 0.0. ⑤ メッシュ: 40 (d) \times 18 (W) \times 18 (h). (6) 作用温度 (OT_n) は以下のように定義される。 $OT_n = (\alpha_r t_r + \alpha_c t_a) / (\alpha_r + \alpha_c)$, ここで, α_r : 放射熱伝達率 ($\text{W}/\text{m}^2\text{C}$) と α_c : 対流熱伝達率 ($\text{W}/\text{m}^2\text{C}$) は以下のように求められる。対流・放射連成解析を行っているため対流熱伝達量 q_c (W/m^2), 放射熱伝達量 q_r (W/m^2) が算出される。また, 皮膚温度 (t_{sk} : $^\circ\text{C}$), 空気温度 (t_a : $^\circ\text{C}$) 及び MRT (=平均放射温度 (t_r : $^\circ\text{C}$)) が既知であるため次式のより α_c と α_r が求まる。 $q_c = \alpha_c (t_a - t_{sk})$, $q_r = \alpha_r (MRT - t_{sk})$. この場合, 人体の放射熱量は次式となる。 $(\alpha_c + \alpha_r) (OT_n - t_{sk}) = q_c + q_r$ (W/m^2) (7) 湿度制御に関しては, 放射パネル冷房の場合は成り行きとする。すなわち, 放射パネル表面が露点温度以下の場合はその水蒸気圧に対応する絶対湿度を与え, 露点温度以上の場合には絶対湿度勾配0を与える。全空気方式の場合は, 室平均相対湿度が放射パネル冷房に対応する60%前後になるように空調吹出空気の相対湿度を0%とする。但し, 計算途中で空調吹出空気の湿度は固定している。結果的にいずれのケースでも相対湿度は60%前後の値となり (図5), 湿度の室内条件設定に関して, 放射パネルと全空気方式は同様な扱いになっている。

参考文献

- 1) 加藤信介, 数値流体力学 CFD の室内温熱環境への応用 (7) (講座), 空気調和衛生工学, 空気調和・衛生工学会, 1998.

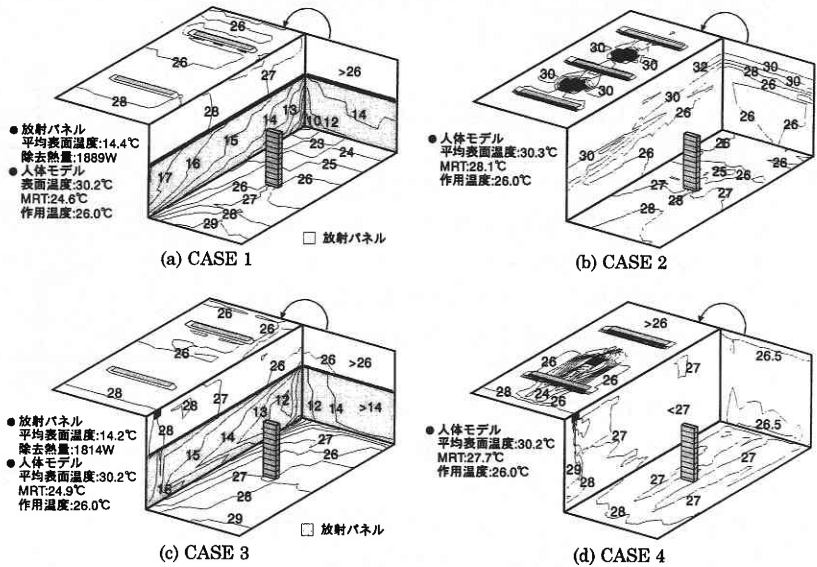


図6 壁面温度

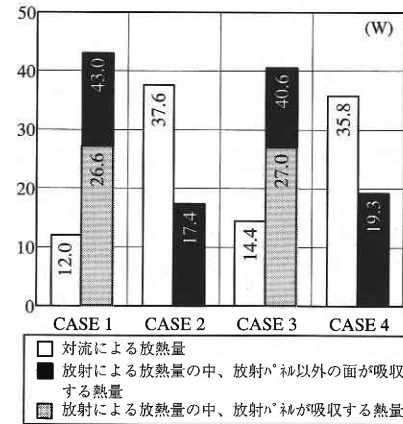


図7 人体モデルの放熱特性

- 1.
- 2) 金泰延, 加藤信介, 村上周三, 対流・放射・湿度輸送と空調システム制御の連成シミュレーション, 作用温度一定条件での空調負荷の評価, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, 1998.
- 3) 金泰延, 村上周三, 加藤信介, 除湿型放射パネルシステムによる温熱・空気環境に関する研究 (その6), 体育館における対流・放射・熱貫流と湿気輸送の連成CFD解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), 1997.
- 4) 村上周三, 加藤信介, 近藤靖史, 高橋義文, 崔棟皓, 対流場, 放射場の連成シミュレーションによる冷房室内の温熱環境解析, 第1報 連成シミュレーションの解法と室内モデルへの適用, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 57, 1995. 2.
- 5) 空気調和衛生工学便覧, 第12版, 3. 空気調和設備設計編, 空気調和・衛生工学会, pp. 335-342, 1995.