

人体の熱的順応を考慮したアダプティブ空調による 空調エネルギーの CFD 解析

Cooling Load Analysis of Adaptive HVAC System Considering Human Thermal Adaptation Using CFD Method

金 泰 延*・加 藤 信 介**・村 上 周 三***
Taejeon KIM, Shinsuke KATO and Shuzo MURAKAMI

1. 序

人体は環境変化に対する生理調節，行動調節を行っており，室内の環境がある程度変化しても着衣調整をはじめとする自発的な温熱環境調節により，不快感を感じることなくその環境に順応する特性があると言われている．このような人体特性を空調設備の設計に活用すれば，環境制御範囲をある程度緩めても温熱環境に関する不満足性を増大させることなく空調運転エネルギーの削減を計ることが可能と考えられる．このような考え方に基づく空調方式をここではアダプティブ空調方式と呼ぶ．本研究では，以上のような人体の環境順応性（アダプティブモデル）^(文1)を仮定して，室内環境制御目標を緩和した場合の室内空調エネルギー削減効果，人体の温冷感指標である PMV 値を目標値に保つための人体の着衣調整等を，室内空調システム制御を組み込んだ対流・放射・湿気輸送の連成解析手法^(文2)を用いて解析する．

2. 対流・放射・湿度輸送と室内空調システム制御連成解析

2.1 対流，放射，湿度輸送の解析

対流計算は標準 $k-\epsilon$ モデルに基づく3次元解析により行う．湿度解析は湿度輸送方程式を解く．放射解析は，形態係数を Monte Carlo 法により求め，壁間相互放射熱伝達解析を Gebhart 吸収係数法により行う^(文3)．

2.2 温熱環境を評価するための人体温熱生理モデル

室内温熱環境は，室中央に設置し

た発熱・放湿する人体モデルで算出される人体の温冷感指標 PMV により定量的に評価する．これは，人体生理モデルを組み込んだ人体の熱収支モデルを用いて算出する^(文4, 5)．

2.3 フィードバックシステムを用いた解析の手順

図1にフィードバックシステムを組み込んだ CFD の連成シミュレーションの手順を示す．

- ① 温熱環境は，人体熱収支モデルを組み込んだ発熱・放湿する人体モデルと室内環境との熱授受を算出し，PMV 値により評価する室内熱輸送解析システム（対流・放射・湿気輸送の連成解析）により解析する（図1中の LOOP 1）．
- ② この室内の温熱環境に関する空調設定目標即ち，人体モデルに対する空調目標 PMV_{sv} と算出された人体モデルの温冷感 (PMV_n) との差から空調システムの条件を修正し（図1中の LOOP 2）再度計算を行う．
- ③ 以降， n 次点の PMV 値が目標値の許容誤差範囲内に留まるまで計算を繰り返す．今回解析対象としたセミオープンスペースの場合，全空気方式の場合は，空調風量を固定し空気温度を制御する方式（CAV 方式），

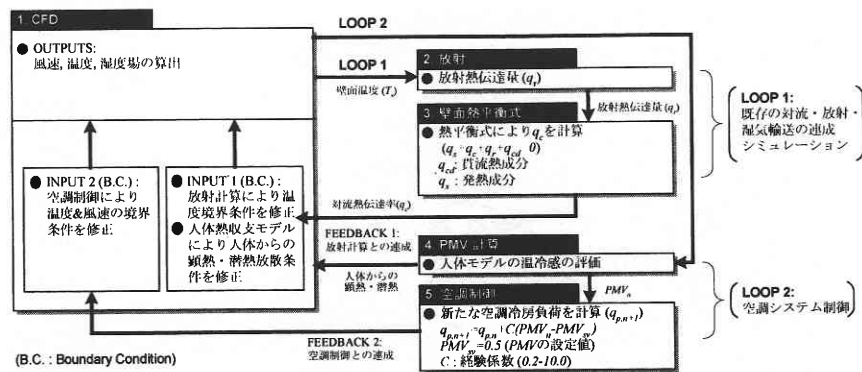


図1 連成シミュレーションの手順

*東京大学生産技術研究所 研究機関研究員
**東京大学生産技術研究所 計測技術開発センター
***東京大学生産技術研究所 第5部

研 究 速 報

放射パネル冷房方式の場合は、パネル表面における吸熱量を制御する方法でシミュレーションを行った。このような収束計算により、室内空調設定目標が満たされた場合の室内温熱環境及び空調条件（冷房負荷）が解析される。

3. アダプティブモデル

人体は多少の温熱環境の変化に対しては、微妙な着衣量や姿勢の変更などにより自律的な温冷感の調整を行い環境に順応する特性がある^(注1)。空調による温熱環境調節を行う際、これらの効果を期待して温熱環境の制御の程度を外部環境の変化などに対応してある程度緩和することは省エネルギーや人体生理反応の健全な維持の観点から一応の有効性を持つものと考えられる。本研究では、人体の環境順応を考慮した空調制御の基礎研究として、空調設定条件の幅を緩和させた場合の、①室内空調エネルギー削減効率、②快適性を保つための着衣量の変化などを解析する。

4. 解析対象

冷房を検討対象とし、図2に示すアトリウム（天井高さ15m）に開放されるセミオープンスペース（床面積18m²）を対象として解析を行う。この室内は放射冷房パネルまたは全空気方式により冷房される。セミオープンスペースが接するアトリウムの空気温度と壁面温度は30°Cと仮定する。また、アトリウム空気の相対湿度は60%、各壁面の放射率は0.9とする。放射冷房パネル（単板型放射パネル）はアトリウム側の開口部を除く3面に設置する。全空気方式の場合、天井にディフューザー型の吹出口と吸込口を設置する。また、アトリウムとの空気混合を最小化するためアトリウム開口部にエアカーテンを設ける。このエアカーテンは顕熱・潜熱負荷を除去しない。計算対象室内の中央に1体の発熱・放湿する人体モデルを設置する。人体モデルには人体の熱収支性状をモデル化した温熱生理モデ

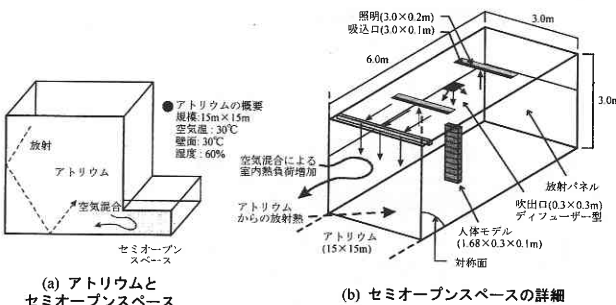


図2 解析対象とセミオープンスペース
(計算領域：対象性などを考慮し、全体の1/2を計算)

ルを組み込み^(文4, 5)、人体とその周辺温熱環境との熱授受を定量的に解析する^(注2)。この人体モデルに対するPMV値により各空調システムの制御を行う。また、便宜上、各壁面による熱貫流成分はないものと仮定する。詳細なCFDの境界条件を表1に示す。

5. 解析ケース

解析ケースを表2に示す。本解析では、人体の着衣量と室内空調制御の目標を与えて、対応する空調運転条件、室内気流・温度分布を解析する。この解析により、設定PMV値、着衣量(clo)に対し、その条件を満たす室内環境とその空調投入熱量の関係が求められる。各空調システムに対し、clo値を固定し、空調目標条件を変化させた場合の室内投入熱量を解析するものをCASE1とする^(注3)。次に、目標PMVを固定し着衣量を変化させた場合の投入熱量を解析するものをCASE2とする^(注4)。各ケースに関して、空調エネルギー削減効率などを解析する。

6. 結 果

6.1 風速分布

PMV設定値0.5、着衣量0.5cloの条件により算出された室内風速分布を図3に示す。図3(a)に示す放射パネル方式の場合、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。放射パネル近傍では、冷却された空気

表1 計算条件

| | |
|----------------|--|
| (1) 圧力境界条件 | 圧力 流入 $k_{in}=3/2(U_{in} \times 0.05)^2$, $\epsilon_{in}=C_d k_{in}^{3/2} / l_{in}$, l_{in} =流入口の幅, $T_{in}=30^\circ\text{C}$ 流出 free slip |
| (2) 吹出口の境界条件 | $k_{in}=3/2(U_{in} \times 0.05)^2$, $\epsilon_{in}=C_d k_{in}^{3/2} / l_{in}$, l_{in} =吹出口の幅, T_{in} =空調システム制御と共に計算上で変化 |
| (3) 壁面、人体の境界条件 | 速度 一般化代数則、対称面は free slip |
| | 温度 α_c 固定(放射パネル:5.5、断熱面:3.0、他:4.0) |
| | 湿度 ① 人体: 顕熱、潜熱発生は人体生理モデルにより決定 ② 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る。露点温度以上の場合には絶対湿度勾配0を与える。 α' はルイス関係により求める。 ③ 他の壁面: 断湿 |
| 放射率 | 壁面、人体:0.9、対称面:0.0 |
| (4) メッシュ | CFD: 40(L) × 18(W) × 18(H)、放射計算: 6(L) × 5(W) × 8(H) |
| [記号] | U_{in} : 流入風の速度 [m/s] k_{in} : 流入風の乱流エネルギー [m ² /s ²] ϵ_{in} : 乱流エネルギーの散逸率 [m ² /s] l_{in} : 吹出口の乱れの長さスケール [m] T_{in} : 流入風の温度 [°C] α_c : 対流熱伝達率 [W/(m ² °C)] α' : 湿気伝達率 [kg/(m ² s(kg/kg))] ≒ 0.001 α_c |

表2 解析ケース

| 解析ケース | 項目 | 空調方式 | |
|-------|----------------------------|-------------|---------|
| | | 放射パネル方式 | 全空気方式 |
| 1 | 空調目標の変更 (着衣量0.5cloに固定) | PMV 0~1.0 | 0~1.0 |
| 2 | 人体の着衣量変更 (PMV設定値0.5に固定) | clo 0.3~0.6 | 0.3~0.6 |

但し、人体の代謝量(1.2Met)は固定

は負の浮力により降下し、時計回りの大きな循環流が生じている。図3(b)に示す全空気方式の場合、空調吹出口から吹き出された冷気は循環流によってよく混合される。また、エアカーテン近傍では吸込口により空気が誘引される様子がみられる。アトリウムとの空気混合量は4780 m³/hで、放射パネル方式(620 m³/h)の約8倍となる。

6.2 温度分布

PMV 設定値 0.5, 着衣量 0.5 clo の条件により算出された室内温度分布を図4に示す。図4(a)に示す放射パネル方式の場合、空間全体で温度成層が生じ、上下温度差が約3~4°C程度となっている。室平均温度は29.2°Cで、全空気方式の場合より約3°C程度高い。図4(b)に示す全空気方式の場合、吹出気流により空気がよく攪拌され、放射パネル方式の場合よりより均一な温度場となっている。吹出口近傍では比較的低温の領域が生じている。なお、より詳細な温熱環境性状に関しては(文6)参照。

6.3. clo 値一定条件における PMV 設定値と空調投入熱量(顕熱)との関係 (CASE1, 図5)

本空調条件の下で室内の目標 PMV 設定条件を緩和させた場合、放射パネル方式の場合は0.1 PMV 当たり約130 W(単位床面積あたり7.2 W/m², 図5(a)), 全空気方式の場合は約270 W(15.0 W/m², 図5(b))の空調エネルギー(顕熱)が削減され、全空気方式の場合がより削減効果が高くなる結果を示した。但し、0.5 PMV の場合の空調投入熱量は、放射パネル方式の場合は約1.4 KW となり、約3.0 KW となる全空気方式の場合の約50%である。また、このとき(0.5 PMV), 空調されないアトリウム空気との混合による冷房負荷は、放射パネル方式の場合は0.6 KW で、全空気方式の場合(2.3 KW)の約26%となる。アトリウムと

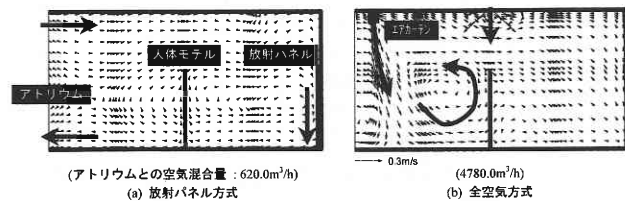


図3 気流分布(空調設定値0.5 PMV, 人体の着衣量0.5 clo, 代謝量1.2 Met, 中央断面)

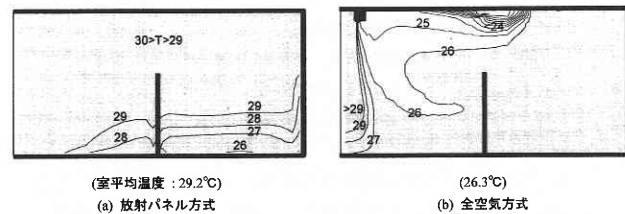


図4 室内温度分布

の放射熱輸送による冷房負荷は、MRTの低い放射パネル方式(0.1 KW)は全空気方式(0.03 KW)の約3倍となる。

6.4 PMV 値一定条件における着衣量と空調投入熱量との関係 (CASE2, 図6)

温冷感を一定に保つための自律的な人体の着衣量調節を仮定した場合、放射パネル方式の場合は0.1 cloの着衣調整により約160 W(単位床面積あたり8.9 W/m², 図6(a)), 全空気方式の場合は約320 W(1.8 W/m² 図6(b))の空調エネルギー顕熱が削減される。また、空気混合による冷房負荷は、放射パネル方式の場合は0.1 cloの着衣調整により顕熱約130 W(7.2 W/m², 図6(a)), 全空気方式の場合は顕熱約300 W(17 W/m², 図6(b))の減少となる。

6.5 作用温度, MRT, 空調条件の変化

6.5.1 clo 値一定条件で, PMV 設定値を変化させた場合 (CASE 1, 図7)

PMV が0.5の場合、放射パネル方式と全空気方式の作用温度はそれぞれ27.6, 28.0°Cとなり、全空気方式の場合が多少高い。放射パネル方式の場合、放射パネル表面温度を約1.2°C変更することにより0.1 PMVを調整することができる。全空気方式の場合は放射パネル方式と同じく吹出風を1.2°C変更することによりPMVを0.1調整することができる。人体のMRTは主に放射で温熱環境調整を行う放

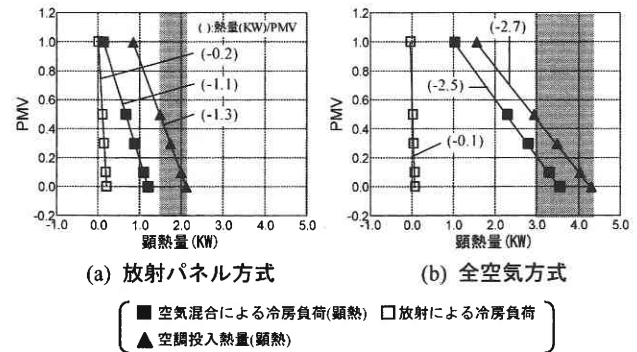


図5 PMV 設定値と空調投入熱量(顕熱)との関係(clo 値一定)(CASE 1, 着衣量: 0.5 clo, PMV 0.0~0.5の範囲の空調投入熱量を着色)

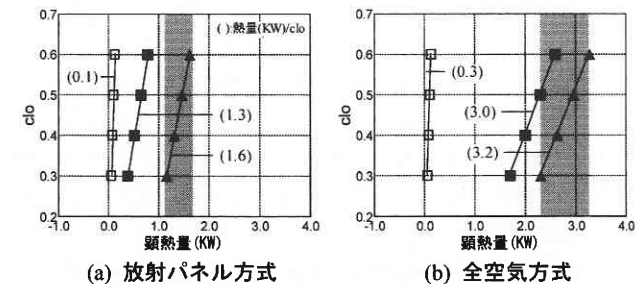


図6 着衣量と空調投入熱量(顕熱)との関係(PMV 値一定, 記号は図5と同じ)

研 究 速 報

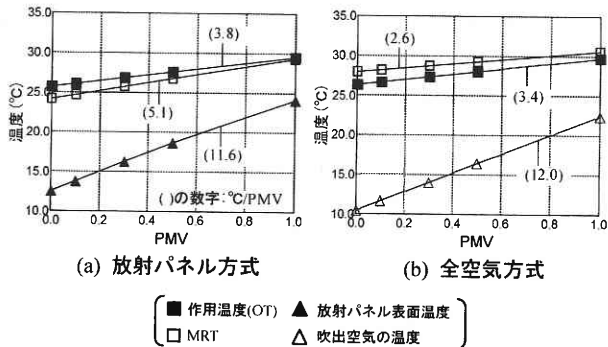


図7 空調目標の変化による作用温度, MRT, 空調条件の変化 (CASE 1, clo 値一定)

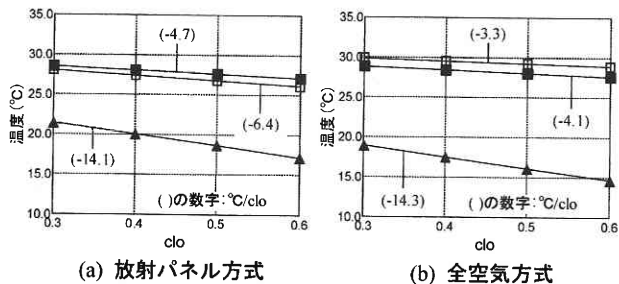


図8 空調目標の変化による作用温度, MRT, 空調条件の変化 (CASE 2, PMV 値一定, 記号は図7と同じ)

射パネル方式の場合が約 1.3 ~ 3.8°C 低い。

6.5.2 PMV 値一定条件で, 着衣量が増加した場合 (CASE 2, 図8)

温冷感を一定に保つための着衣調整を仮定した場合, 放射パネル表面温度と全空気方式の吹出風の温度は 0.1 clo の着衣調整により約 1.4°C 緩和させられる。平均皮膚表面温度, MRT は全空気方式の方が放射パネル方式より多少低い値を示す。

7. ま と め

- (1) 対流・放射・空調システム制御の CFD 連成シミュレーションにより空調設定値の変更による空調エネルギー削減効率の変化, 及びそのときの温冷感を一定に保つための着衣量などを解析した。
- (2) 本空調条件の下で人体の熱的順応を考慮した空調を行う場合, 設定条件の緩和などにより削減できる空調エネルギー量は, 全空気方式の場合が放射パネル方式より大きい。但し, もともとの空調投入熱量は全空気方式の場合が約 2 倍大きい。今回の条件では放射パネル方式は常に全空気方式に対して省エネルギー的である。
- (3) 人体の着衣調整により少なからずの空調投入エネルギー使用量の削減を期待できる。

(1999 年 11 月 15 日受理)

注

- (1) (文 1) では行動による順応 (Behavioral Adaptation) と定義している。また, 「熱的順応」を「熱的適応」と定義した方がより明確になる場合もあると思われるが, 本論文では全て「熱的順応」と定義する。
- (2) 人体熱収支式は単位面積当たりの物理量 (熱, 湿度) となっており実際の人間と異なる面積を持つ人体モデルに適用するため以下のような修正を行った。

$$Q_{cl}' = Q_{cl} \times A_h / A_m \quad [W/m^2] \quad (a)$$

$$m_{sk}' = E_{sk} / h_{fg} \times A_h / A_m \quad [kg/(m^2 \cdot s)] \quad (b)$$

ただし,

Q_{cl} : 衣服表面からの顕熱放散量 $[W/m^2]$

Q_{cl}' : Q_{cl} の修正量 $[W/m^2]$

m_{sk} : 皮膚表面からの水分蒸発量 $[kg/(m^2 \cdot s)]$

m_{sk}' : m_{sk} の修正量 $[kg/(m^2 \cdot s)]$

A_h : 実人体の表面積 $[m^2]$

A_m : 人体モデルの表面積 $[m^2]$

ここで, 実人体の表面積は DuBois 式 (文 4, 5) から求まる。

$$A_h = 0.202 m^{0.425} \times l^{0.725} \quad [m^2] \quad (c)$$

m : 体重 $[kg]$ l : 身長 $[m]$

- (3) 人体が屋外環境, 季節などによってどの程度環境に順応できるかは未だ研究段階であり, 確実な順応範囲を決めることは難しい。そのため, 本研究では, 便宜的に PMV の 0.0 ~ 1.0 の範囲で空調投入熱量と PMV 設定値との関係を解析する。
- (4) 冷房時の着衣量の変更範囲を便宜的に 0.3 ~ 0.6 clo とする。

参 考 文 献

- 1) Richard J. de Dear, Gail Schiller Brager: Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference, ASHRAE Transactions, Vol. 104, 1998.
- 2) 加藤信介, 金泰延, 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, 第 1 報 作用温度一定条件での空調負荷の評価, 空気調和・衛生工学会論文集, 1999. 7.
- 3) 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.
- 4) ASHRAE HANDBOOK, Fundamentals, Chapter 8, Physiological Principles and thermal comfort, 1993.
- 5) Fanger, P. O.: Thermal Comfort, Danish Technical Press, 1970.
- 6) 平山禎久, 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 (その 4), PMV 一定条件での空調負荷の評価, 日本建築学会学術大会講演会梗概集, 1999. 9.