

LESによる冷房時の天井付着噴流の解析

Numerical Analysis of Ceiling-attached Jet in Air-conditioned Room

村上 周三*・沢田 郁夫**・加藤 信介*・持田 灯*

Shuzo MURAKAMI, Ikuo SAWADA, Shinsuke KATO and Akashi MOCHIDA

1. 序

本研究は、冷房気流を天井面に付着させて室内を冷房する方式に関し、室内の気流性状とその温熱環境を解析するものである。天井面に冷たい吹出し噴流が付着した後剥離する性状は、室形状や室内の発熱条件により大きな影響を受けると考えられる。これらを定量的に検討するには実大の模型実験やLES (Large Eddy Simulation) 等の精密な乱流シミュレーションが有力な方法となる。本報告では実験に先立ちLESにより室内の流れ場性状を検討した結果を示す。サブグリッドモデルに単純スマゴリンスキーモデルを用いたLESにより、低温の吹出し噴流が天井面に付着し剥離する現象を、室形状、室内発熱条件の関係から解析する。この結果を参考にして実験計画を作成する。

2. 天井付着噴流を利用した放射冷房効果併用型冷房方式

2.1 放射冷房併用の効果

一般に居室の冷房は、窓部等より侵入あるいは人や機器から発熱し、最終的に空気に伝達される熱に対して、対応する冷却空気を室内に供給することにより、室空気温度を所定の値に維持するものと考えられる。しかし、このように最終的に対流熱伝達される熱量に着目して冷却空気の室内供給温度、風量を設定し、これをそのまま室内空気と攪拌して冷房することは、室内の気流分布、温熱環境制御の面からは必ずしも得策ではない。冷房負荷として室内で発生する熱には、負荷源から放射熱伝達により室内に拡散した後、空気に対流熱伝達される成分も多くある。室内に冷熱面を設置し、これら放射熱を直接吸熱させることができれば、直接室内空気に投入する冷却空気の温度をある程度上昇させることができ、その分、室内の温度分布を小さく

することができる。これは冷房時によく問題となる冷気流によるコールドドラフトの問題を根本的に緩和する方法となる。

2.2 天井付着噴流を利用した放射冷房¹⁾

室内に冷熱面を設ける方法は様々なものが考えられるが、最も低コストでこれを実現する方法は、室内に供給される冷房気流そのものを固体壁に付着させ、これを直接冷却する事である。この冷却により冷房気流自身は昇温するため、コールドドラフトの問題も緩和される。天井面で冷房気流を付着させる方法は、①壁面などと比べ気流障害物が設置される可能性が小さく付着効果が望めること、②浮力により降下する傾向の強い冷気を室上部で供給することになり、供給空気の室内混合が促進されて温度分布が生じにくくなる傾向となることから最も有望な方法の一つと考えられる。

2.3 冷却噴流の天井付着効果の検討

コアンダ効果による天井付着性を高めるためには、冷房気流をスロット吹出しなどによる2次元噴流とすることが重要となる。しかし天井付着噴流は対向壁に噴流が到達する以前に、摩擦や循環流による静圧上昇により剥離する可能性がある。また一旦、付着噴流が剥離すると浮力効果により過大な風速で室内居住域に冷気が到達し、コールドドラフトとなる可能性が生じる。このため冷房気流を天井面に付着させて室内を冷房する場合にはその天井付着性能を十分に検討する必要が生じる。本研究はこの点に関して詳細に検討を行うものである。

3. 数値解析手法

3.1 解析対象

図1に示すように直方体形状の短辺側一面に窓がある部屋を想定する。窓上部の水平スロット吹出し口より天井面に沿って冷却空気を吹出し、その天井付着噴流の性状を検討する。想定した部屋の大きさは、奥行き5400[mm]×高

*東京大学生産技術研究所 第5部

**新日本製鐵(株)

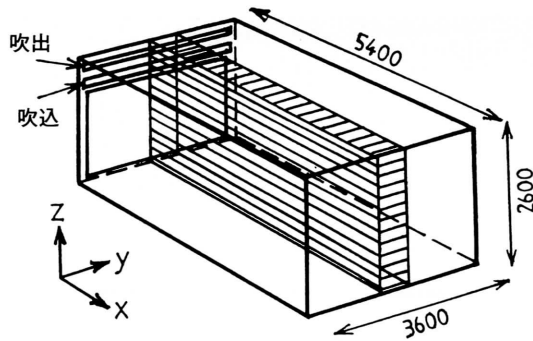


図1 計算対象となる室内空間領域

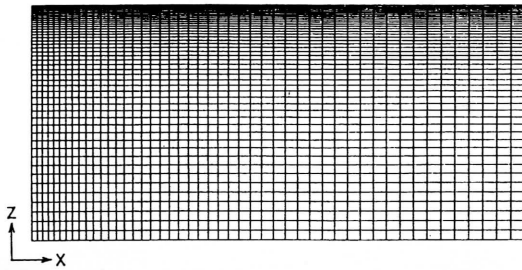


図2 計算に用いられたメッシュ図

さ2600 [mm]×幅3600 [mm] である。スロット吹出し口の横幅は噴流が二次元的となりコアンダ効果による天井への付着性が得られやすいよう、室幅と同等の長さとしている。尚、実際の数値計算ではこの空間全域に十分な格子点を配置することは計算負荷上困難なので、室の一部の空間内の流れを解析している。すなわち、図1の斜線で示された幅500 [mm] の部分のみを解析している。

計算に用いた格子を図2に示す。メッシュ分割は50×50×10であり、天井近傍にメッシュを集中させている。

3.2 基礎方程式及び境界条件

単純スマゴリンスキーモデルに基づくLESにより解析する。速度場と温度場を連成して解いた。温度変化による密度変化の効果はブシネスク近似を用いて考慮する。サブグリッドスケールモデルには浮力効果を考慮していない。また、スマゴリンスキー定数 $C_s=0.16$ 、乱流プラントル数 $Pr_{SGS}=0.5$ とした。

壁面における速度境界条件としては linear and power law 型の2層モデル²⁾を用いた。壁面における温度境界条件としては天井面および窓面を含む側壁面は断熱条件とし、床面に関しては後述するように発熱条件とした。また、仮想境界面には周期境界条件を課した。

速度の流入、流出境界条件は以下のように設定した。窓側壁の窓上で天井より下方73 [mm] の位置に厚み30 [mm] の水平スロット吹出し口を設け、吹出し速度および吹出し

温度は一律3.0 [m/s], 21 [°C] (室内平均温度26 [°C] とする) とした。また、吹出し口と窓との間で天井より下方365 [mm] の位置に厚み102 [mm] の吸込み口を設け、流入流量と等しい流出流量とした。

3.3 床面での発熱境界条件

床面には発熱条件を課したが、その発熱分布は窓から侵入する日射の影響や内部発熱による負荷を考慮し、以下の3ケースに関して計算を行った。

1) Case 1 (基本ケース)

発熱なし、室温と同じ温度で吹き出し。

2) Case 2

全発熱量の75%を窓側半分の床面から、25%を対向壁側(窓から遠い側)半分の床面から発生させる。

3) Case 3

全発熱量の25%を窓側半分の床面から、75%を対向壁側半分の床面から発生させる。

4. 解析結果

4.1 等温の場合 (Case 1)

無風の初期条件より上記境界条件にて計算を開始し、ほぼ定常状態となる120~150 [s] の間の時間平均風速の計算結果を図3に示す。吹出し口からの噴流はコアンダ現象により天井面に付着し室内長手方向に4割程進んだ地点で天井より離れ室内下方に広がる。その後、床近傍に沿って窓側に向かう循環流を形成している。壁噴流となる長さは吹出し口厚みの60~70倍の距離となる。また、床近傍に下降した気流の流速は50 [cm/s] 程度で吹出し風速の約1/6の値となる。このように等温状態の解析では、天井面付着距離は比較的短く床付近の気流も比較的強くなっている。

4.2 非等温窓側加熱の場合 (Case 2)

無風、室温26 [°C] の初期条件より上記境界条件にて計算を開始し、0~120 [s] までの風速ベクトルの経時変化を図4に示す。また、流速分布がほぼ定常状態となる120~150 [s] の間の時間平均風速、時間平均気温分布および時間平均圧力分布の計算結果を図5-a), b), c) に示す。

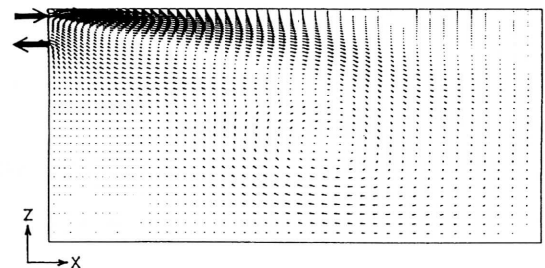
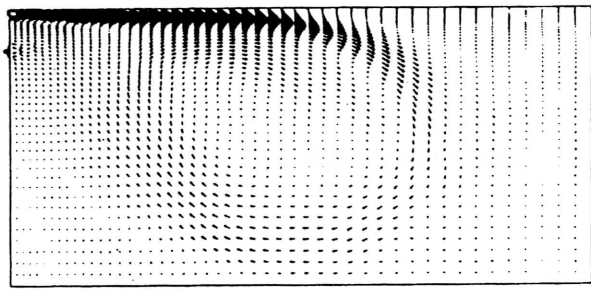
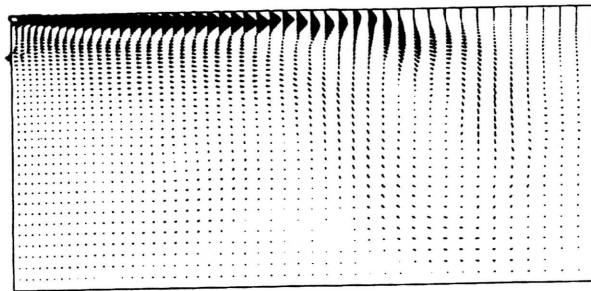


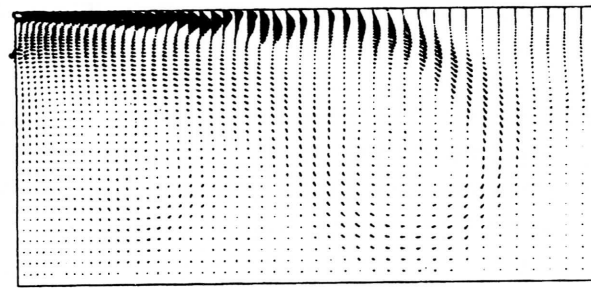
図3 等温系における時間平均風速ベクトル分布の計算結果 (Case 1)



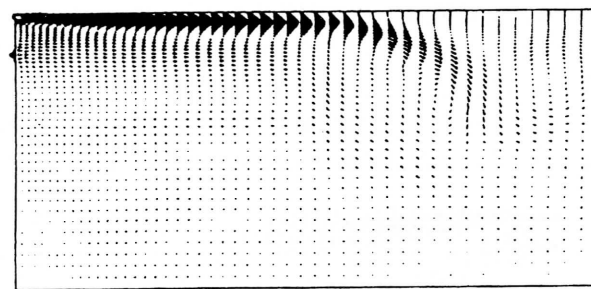
Time = 30[s]



Time = 60[s]



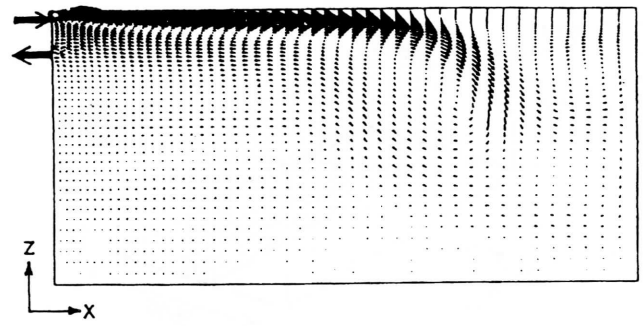
Time = 90[s]



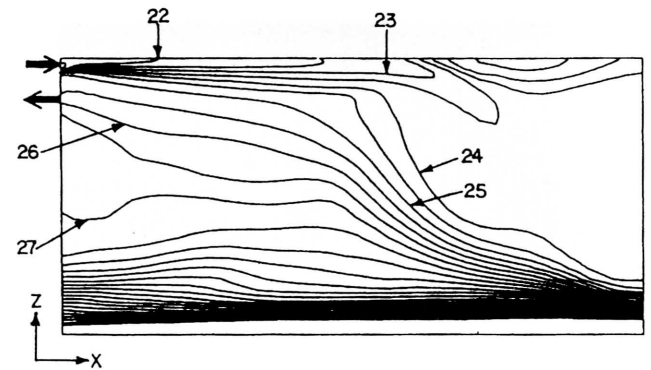
Time = 120[s]

図4 非等温系における風速ベクトル経時変化の計算結果(瞬時値)
(主な発熱源が窓側にあるケース: Case 2)

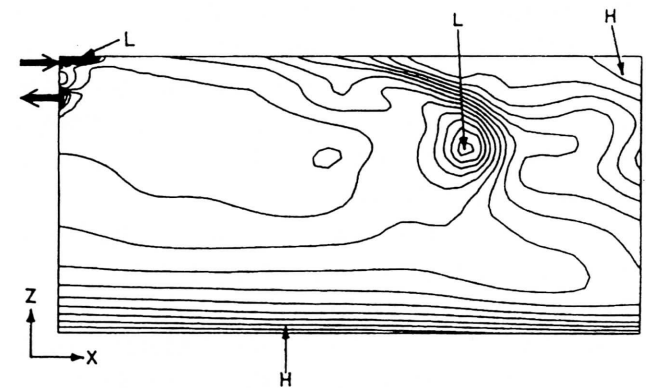
等温系の解析と異なり噴流の付着距離は長手方向に7割程度の位置(吹出し口厚みの120~130倍の距離)まで伸びて



a) 時間平均風速ベクトル分布



b) 時間平均気温分布



c) 時間平均圧力分布

図5 非等温系における時間平均値の計算結果
(主な発熱源が窓側にあるケース: Case 2)

おり, 比較的安定な天井付着噴流を形成している。

図6に三次元噴流の噴流中心軌跡を文献³⁾に示される経験式から推定して示す。これはCase 2と同じ吹出し口断面積をアスペクト比をより小さくして幅1000[mm]×厚み100[mm]とした場合の吹出し口からの非等温噴流(自由噴流)の軌跡を示す。図6に併せてCase 2での二次元噴流の噴流中心軌跡との比較を示す。三次元噴流は浮力により早期に降下して床面に再付着するドラフト流れとなるが,

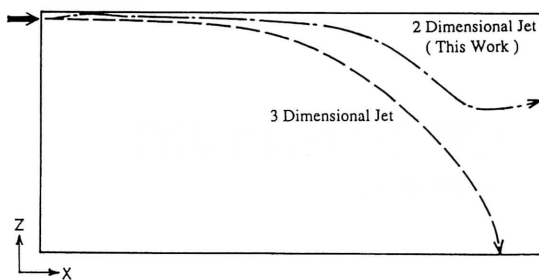
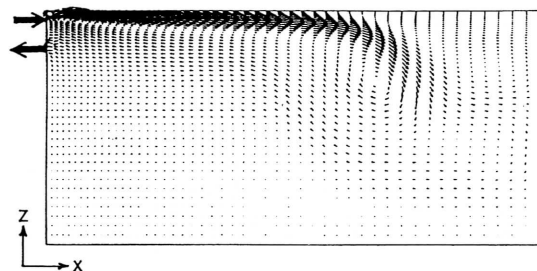


図 6 三次元噴流軌跡と本計算結果との比較

図 7 非等温系における時間平均風速ベクトルの計算結果
(主な発熱源が窓と反対側にあるケース：Case 3)

二次元噴流の場合には効果的な天井付着噴流となることがわかる。

Case 2 では天井付着噴流は剥離した後、一部は対向壁に再付着して床面に達する。その一部は緩やかな気流となって床面に向い付着することなく窓側排出口へ向かう循環流を形成する。この窓側吸込み口へ向かうリターン流れは、床面から発生する熱上昇のために天井面側に押し上げられ天井付着噴流のすぐ下を流れる。この吸込み口に向かうリターン流れは上記天井付着噴流を天井面に押し上げ、付着距離を延ばす効果を持っているものと考えられる。また、下降流の床面近傍の流速は $0 \sim 20$ [cm/s] 程度と緩やかであり、居住域への高風速の冷気流によるコールドドラフトの可能性は小さい。

一方、図 5 - c) に静圧分布 (図中 H は高压部, L は低压部を示す) を示すが、対向壁上部に循環流形成に基づく圧力の高い領域が生成されており、これが付着噴流の剥離の原因となっていることがわかる。また室内下面は発熱の

ため静圧も高くなっている。

図 5 - b) に温度分布を示す。これによれば付着噴流の顕著な室内左半分天井面温度は室内平均温度 (26 [°C]) よりも $3 \sim 4$ [°C] 程度低く保たれており、左半分の空間では天井面を冷却面として利用する放射冷房効果が期待できる。室内右半分の空間においては付着噴流の剥離により天井面からの放射冷房効果は期待できないが、緩やかな下降流による室温低下が観られ対流冷房効果が十分期待できる。

4.3 非等温対向壁側加熱の場合 (Case 3)

計算開始後 $120 \sim 150$ [s] の間の時間平均風速分布の計算結果を図 7 に示す。図 5 - a) と比較して、付着噴流の剥離位置はほぼ同じであり、剥離後の循環渦の中心がわずかに左上側に移っている。このように Case 2 と Case 3 では大きな差異は見られない。すなわち、今回のケースでは天井付着噴流の形成は床面からの発熱分布条件にさほど影響されないとと言える。

5. 結 言

LES を用いた、スロット冷房吹出しによる室内気流の三次元解析により以下の知見が得られた。

- 1) 室内の短辺側面にある窓上より 2 次元水平スロット吹出しを行うことで特に冷房時に比較的安定な天井付着噴流を形成できることを確認した。
- 2) 天井付着噴流はコアンダ付着効果および床面加熱による上昇暖気流れによる噴流の剥離抑制効果により形成されるものと考えられる。
- 3) 天井付着噴流の形成は床面からの発熱分布条件にはあまり左右されない。

(1995年 3 月 6 日受理)

参 考 文 献

- 1) 崔棟皓, 村上周三, 加藤信介, 高橋義文: 天井パネル面吹出冷房, 及び水平スロット吹出冷房方式の検討, 空調学会学術講演会論文集, 1991.10
- 2) 水谷国男, 村上周三, 持田灯, 富永禎秀: LES による非等温室内気流解析, 空調学会学術講演会論文集, 1992.10
- 3) 井上宇市: 空調ハンドブック [丸善] 改訂 3 版, p 350