

## 置換空調による室内上下温度分布予測モデルの開発に関する研究

創造理工学専攻 環境都市コース 616100003-4 石黒 亮  
(指導教員 近本智行)

## 1. 背景・目的

従来、空調設計は室内での完全拡散を前提として行われるが、設計時に完全拡散を前提とすると居住域以外も空調を行ってしまい、エネルギーの大きな浪費につながる可能性がある。特に空間が大きくなるとその特徴が顕著となる。そこで、大空間では居住域のみを対象とした部分空調が有効と考えられ、その一例として室下部から給気、上部から排気することで、室内に鉛直温度分布を形成する置換空調が挙げられる。しかし、置換空調の設計手法、評価手法は十分に確立されておらず、空調システムが性能を発揮できるかを判断することが難しい。そのため、広く普及には至っていないのが実情である。そして現在、快適性と生産性の向上と共に、より厳密な省エネルギー性が求められるようになっている。そのため、こういった空調方式の普及を目指すためにも、予測手法、設計ツールの確立が重要と考えられる。

そこで本研究では置換空調時の温度分布の予測ツールを確立することを目的とする。CFD（コンピュータを用いた流体解析）による詳細な空間解析と、上下温度分布予測モデルの開発を行う。

## 2. 研究概要

置換空調を行う空間の室内温熱環境の予測を行うツールを作成することを目的とする。まずは CFD により、置換空調を使用した空間の解析を行う。既往研究より設計条件からの解析では実際の環境を再現できニアことが確認されている<sup>5)</sup>。このことから本解析は実験データを基に行い、CFD による置換空調の解析精度の向上を図る。次に精度が確認できた解析モデルのデータを基に、戸河里らが大空間における温度分布予測モデルとして提唱したブロックモデルをベースとして、置換空調を使用した場合の、室内温熱環境を予測するツールを作成する。

## 3. 実験および実験結果を用いた CFD 解析

## 3.1 実験概要

図1に示す半円筒形の吹出口を有する実験室（図2）で実際に置換空調を行い、吹出口付近の流れ場及び室全体の温度場がどのように形成されるかを測定する。実験では吹出温度を 20℃（一部 22℃と 18℃も行う）に設定し、吹出流量を 600m<sup>3</sup>/h、900m<sup>3</sup>/h、1200m<sup>3</sup>/h と変化させ、更に各ケースで発熱体の熱量を 1000W、2000W、3000W と変化させた合計 11 ケースを行う（表1）。空調を開始後、

定常状態となったところで各測定点の温度と吹出口周りの風速を測定する。温熱環境の測定センサーの配置は図3に示す。

また、CFD でより適切な境界条件を与えるために、詳細な測定を行う（表2）。スモークを用いて可視化した予備実験により、吹出気流に鉛直方向の速度分布と斜め下方向への吹出傾向がみられたため、図4に示す吹出口周りの風速の詳細測定及びタフトによる吹出角度測定を行う。また、熱貫流による壁面からの熱の漏れを再現するため、サーモカメラで壁面放射温度の測定を行う。

## 3.2 実験結果

壁面の温御分布を測定した結果、発熱量により温度に違いはあるが流量が同じならば壁面温度の分布性状はほぼ同じであることが確認された。今回解析ではこの測定された天井・壁面・床の表面温度分布を CFD の壁面温度境界条件として与える。

表1 実験ケース

Case	流量 (m <sup>3</sup> /h)	発熱体 (W)	吹出温度 (°C)
①-1	600	1000	20
①-2		2000	
①-3		3000	
②-1	900	1000	
②-2		2000	
②-3		3000	
②-4	3000		18
②-5			22
③-1	1200	1000	20
③-2		2000	
③-3		3000	



図1 置換空調吹出部分

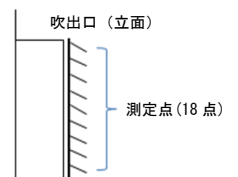


表2 実験実施項目

実施項目	目的
吹出流量の詳細測定	CFD 境界条件設定
タフト実験	
壁面放射温度の測定	CFD 精度検証
実験室内温熱環境実測	CFD 精度検証

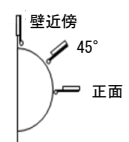


図4 吹出詳細測定図

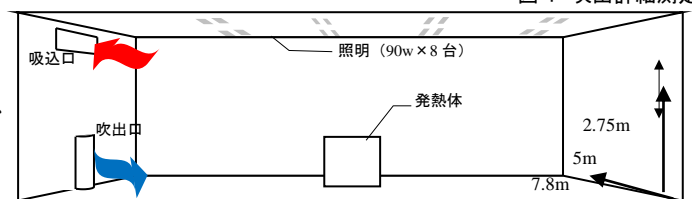
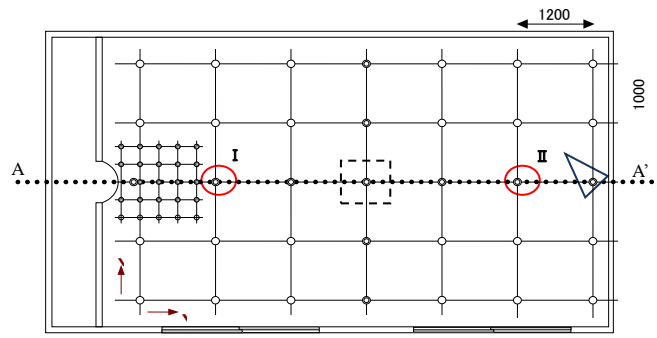


図2 実験室



○ 温度測定点 ● 温度及び風速測定点 (鉛直: 床上 0mm から 250mm ごとに 11 点)  
 ○ 鉛直温度分布プロファイル点 ▲ サーマカメラ撮影位置  
 図3 センサー配置

また、吹出口周辺の風速・風向測定の結果から吹出口近傍の風速分布の詳細を算出した図2。この結果から解析において、吹出気流を詳細に再現したモデルと吹出気流が均一であると仮定した二つのパターンを検討対象とする。

### 3.4. 解析概要

CFD では、前述の実験室を再現する。境界条件のうち壁面温度としてサーモカメラにより測定した値を与え、吹出口は半円筒形の表面を鉛直方向に 18 等分し、ゾーンごとに吹出風速と角度を変化させ吹出気流を詳細に再現するケースと、均等に空気が吹出すと仮定するケースとを解析する。室内には照明器具 (発熱量 45W、8 台)、発熱体 (1 台) の 2 種類の負荷を与える。実験と同様に、吹出流量を 600m<sup>3</sup>/h、900 m<sup>3</sup>/h、1200 m<sup>3</sup>/h、発熱体は発熱量を 1000W、2000W、3000W と変化させた際の発熱体の各面の表面温度を与えた。解析手法としては移流項の差分は QUICK、乱流モデルは標準 k-ε モデルを使用し、合計 22 ケースの解析を行う。

### 3.5. 解析結果と実験結果の比較

#### 3.5.1 温熱環境比較

解析と実験の温度分布を図7に示す。18分割吹出しと均一吹出しとでは、室全体の温度成層のでき方にはあまり差は見られなかったが、発熱体上部のプルームの形状や、吹出し口周りの温度成層の状態に違いがみられた。

図8に示す鉛直温度分布プロファイルでは、18分割吹出しと均一吹出しとでは、鉛直温度分布形状にあまり差はみられなかった。またプロファイル点Iおよびプロファイル点II共に実験値に比較的近い値を示した。実験結果との比較では、解析と実験とで同様の傾向を示しているケースもあるが、全体としては温度勾配が緩やかになっており、実験結果に比べると、強く拡散している可能性が高い。

また、前報で報告した実験・解析結果と今回の実験・解析結果を比較すると、上下方向の温度勾配が緩くなり、

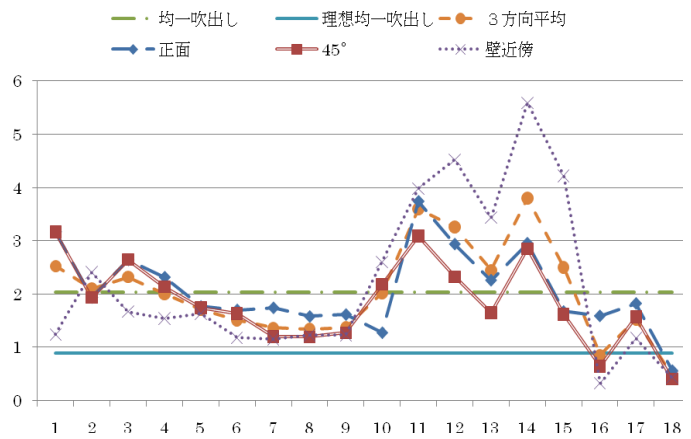
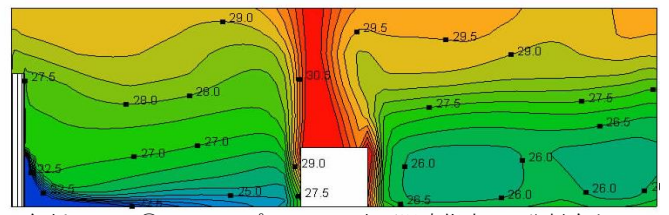
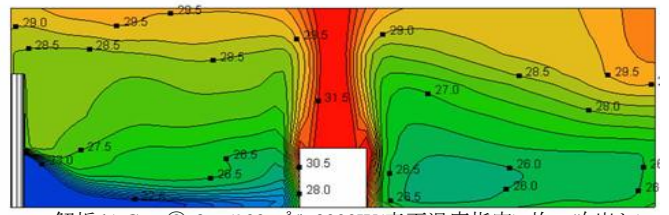


図5 吹出口近傍風速分布 (600 m<sup>3</sup>/h)



解析 a) Case②-3 (900 m<sup>3</sup>/h 3000W(表面温度指定) 18 分割吹出し)



解析 b) Case②-3 (900 m<sup>3</sup>/h 3000W(表面温度指定) 均一吹出し)

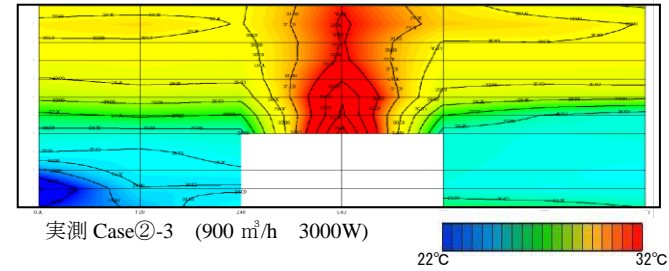
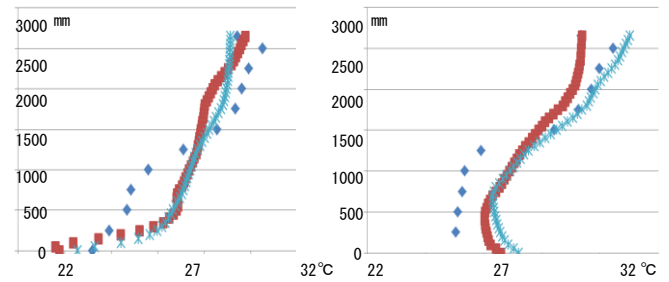


図6 実験と解析結果比較



プロファイル点 I                      プロファイル点 II  
 図7 鉛直温度分布 (900 m<sup>3</sup>/h 3000W)

より実験結果に近づいていることが確認できる。今回解析では、解析精度の向上が確認された。

### 3.5.2 処理熱量比較 (図 13)

各ケースの処理熱量を算出した。実験結果と解析結果における処理熱量は全体として解析側の結果が実験側に比べて低い値を示した。これは解析結果が強く拡散して、吸込口付近の温度が低下したためと考えられる。

### 3.6. 実測・解析結果比較まとめ

上記の結果から、実験結果と若干の誤差はあるものの、温度成層の発生状況や、吹出口周辺の熱環境など定性的にはよく一致した。今回解析精度を向上をはかるにあたり、吹出風速状況の再現と壁面温度分布の再現を行ったが、吹出気流が均一の場合と 18 分割で再現した場合での解析結果に大きな違いは見られなかったことから、今回解析結果の精度が高い要因は壁面温度分布や、発熱体を表面温度で評価したものが大きいと考えられる。

## 4 温度分布予測モデル構築

### 4.1 ブロックモデル概要 (図 9)

大空間における上下温度分布予測モデルとして戸河里らが提唱したブロックモデルがある<sup>文2)</sup>。これは大空間において室内の水平温度分布がおおよそ一様であることから、空間を鉛直方向に分割することで簡易に上下温度分布を予測するものである。

本研究の検討対象である置換空調では、給気を室下部から給気を行い室上部から排気を行うため、安定した温度成層が発生する。このことから、ブロックモデルを置換空調の上下温度分布予測モデルとして適応できる<sup>文3)</sup>。

### 4.2 緩衝ブロック定義 (図 10)

大空間におけるブロックモデルでは、室内水平方向では温度が均一として扱っている。また、発熱体からの対流成分はすべてがプルームに伝わるとして扱われている。しかし、実際の空間において大型発熱体近傍では明らかにプルーム以外で温度上昇が見られ、また排気機構を持つ発熱体では、そういったことが顕著に表れる。この点を従来のブロックモデルに適応した場合、居住域への熱の流入が平均化され、結果ブロック温度が高く評価されてしまう。そこで本モデルでは大型発熱体近傍の居住域空間を緩衝ブロックとして定義する。緩衝ブロックを置くことで、排気による居住域に対する流入分の熱量を緩衝ブロックで一度受け、居住域のブロックでの温度が過剰に評価されることを防ぐことができ、より精度の高い温度分布を再現することを目的とする。

### 4.3. ブロックモデルの計算方法

計算ルーチンを図 11 に示す。本モデルは最初に、壁体情報、発熱体条件、対流熱伝達率、給排気風量、を入力する。次に各ブロック温度仮定値を入力する。

初期入力値及び仮定したブロック温度から、各壁面から発生する下降流（上昇流）を算出する、対流熱伝達率

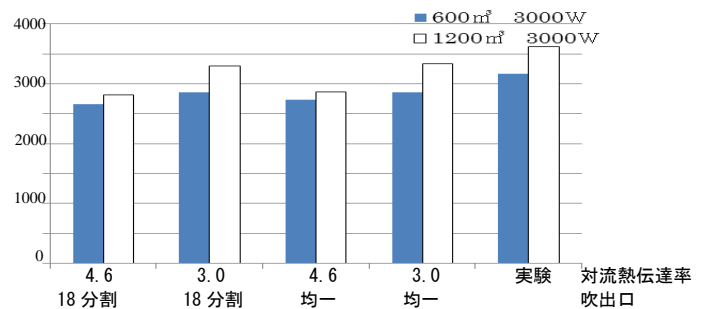


図 8 処理熱量 (3000W)

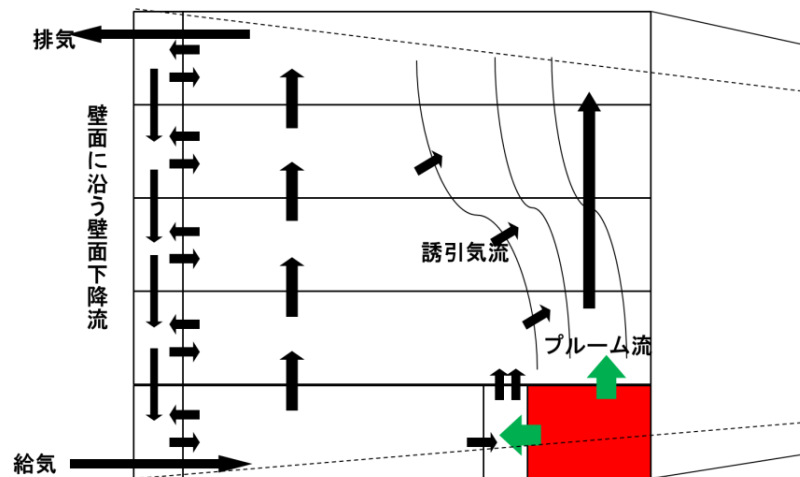


図 9 ブロックモデル概要

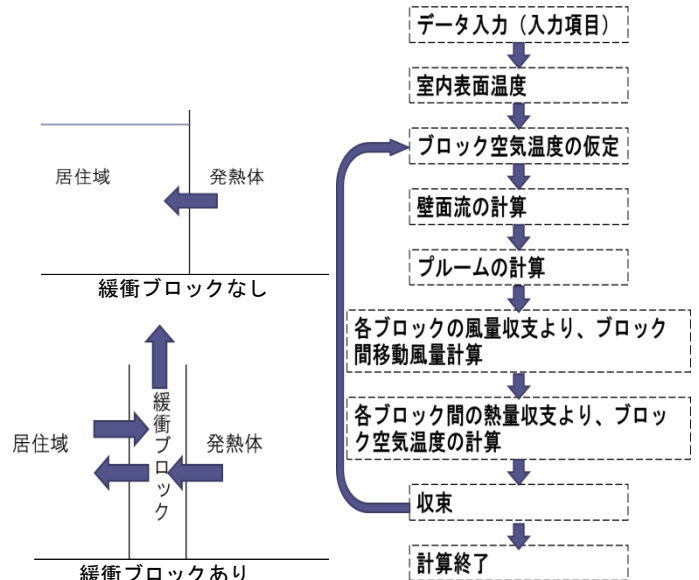


図 10 緩衝ブロックイメージ

図 11 計算ルーチン

については、今回は CFD での解析と同様の値である 4.6W/h を用いて計算を行った。

次にプルーム流量の算出を行う。今回検討する置換空調

では給気は室内への影響は小さい。しかし、本検討のモデルでは大型発熱体を想定しているため、発熱体からのプルームによる室内温度分布への影響が大きい。そこで本検討ではプルーム流量を文献値<sup>文4)</sup>より算出し、各ブロックで高さでのプルーム流量から各ブロックからの誘引気流量を算出する。

次に緩衝ブロックにおける上昇流の流量を算出する。この上昇流については同一高さの居住域のブロック温度との温度差から発生する浮力を基に上昇流の流量を算定する。その結果から緩衝ブロック内の熱量収支を計算し、緩衝ブロック温度を算出する。

最後に壁面流およびプルーム流、緩衝ブロックの風量から上下ブロック間の風量収支の算出と、各ブロックの熱量収支を計算し、各ブロック温度を算出する。熱量収支の計算においては、上下ブロック管および隣接するブロック間の熱伝達について熱移動係数  $C_b$  を定義し、計算を行う。

#### 4.4 解析ケース

本検討では CFD による解析結果との比較を行うため、表 1 に示すケースのうち代表ケースとして、発熱量 1000W、900 m<sup>3</sup>/h、2000W・900 m<sup>3</sup>/h、3000W・1200 m<sup>3</sup>/h、の三つのケースにおいて温熱環境および処理熱量について比較を行った。

#### 4.5 解析結果

##### 4.5.1 温度勾配 (図 1 2)

本検討モデルの温熱環境の再現性については、CFD による解析結果に比べ室温を低く評価する傾向が確認された。これは空間上部に近づくにつれ、CFD の結果に近づくものの、居住域部分ではどのケースについても低い値となっている。これは緩衝ブロックからの居住域部分への熱の流入がうまく再現できず、吹き出し気流の影響が大きいためと考えられる。

##### 4.5.2 処理熱量 (図 1 3)

処理熱量については吸込口高そのブロック温度と吹出温度から算出する。置換空調では排気は空間上部から行うため、温熱環境の再現性に比べて処理熱量の再現性の方が高くなっている。しかし CFD の結果との吸込口高さでの温度差がそのまま処理熱量差に表れていない。これは水平方向については、温度分布はなく一様な空間をとしているため、CFD の解析結果では吸込口近傍の空気温度と同一高さの平均温度に差があるため、ブロック温度と平均温度が合致しても誤差があると考えられる。

## 5. まとめ

実験室実験および CFD 解析により、置換空調を使用した空間の解析精度を維持するためには、吹出気流の性状の再現の影響は少なく、壁面からの熱流入量の再現が非常に重要であることが確認された。

また、本研究で提案した上下温度分布予測モデルは、

解析全体としては室温を過小評価していたが、温度分布の傾向や各設定条件の違いによる傾向の差は、解析結果と同様のものを示していた。

通常壁面温度は未知であるため、外気温情報、壁面の熱伝導率から結果を算出する。しかし本報ではまずは緩衝ブロックモデルの精度を確認するために解析時の室内壁面温度分布を用いて計算を行った。今後は実際の建物における実測し、様々な条件の壁面、発熱体、給気などから比較を行い、より精度の高いモデルへと改良を行っていく。

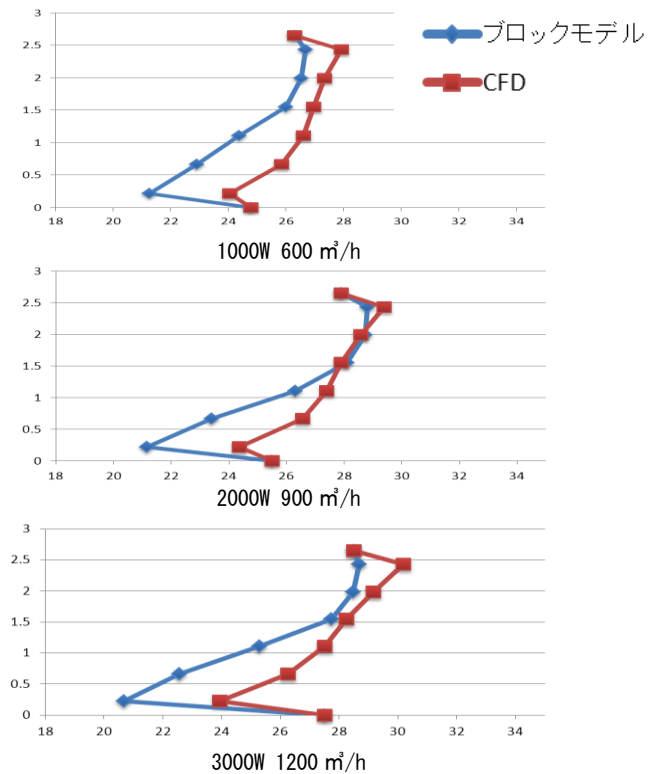


図 1 2 温度勾配

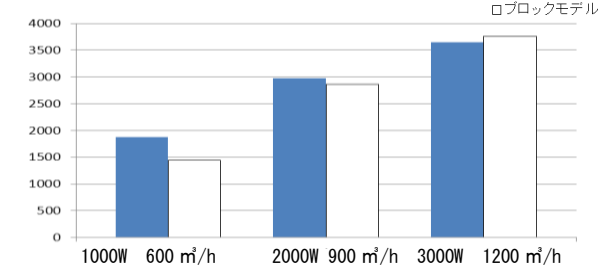


図 1 3 処理熱量

#### 参考文献

- 1) 岸本、近本、石黒：置換空調の予測・評価精度向上に関する研究 (その1)、日本建築学会大会学術講演梗概集pp.1179-1180、2010年9月
- 2) 戸河里、荒井、三浦：大空間における上下温度分布の予測モデル：大空間の空調・熱環境計画手法の研究 その1、日本建築学会計画系論文報告集 (427), pp9-19, 1991年09月
- 3) 東本、山中、甲谷、花野：冷却面を有する置換換気室内の温度・汚染物濃度分布：熱プルームを組み込んだブロックモデルの適用、日本建築学会環境系論文集 (571), pp 47-53, 2003年09月
- 4) 社団法人空調衛生工学会：置換換気ガイドブッカー基礎と応用