

移流・拡散分析に基づくオフィス空間内の温度分布簡易予測モデルの開発

創造理工学専攻 環境都市コース 6164110008-0 大西 堯
(指導教員 近本智行)

1. はじめに

1.1 研究背景

中小規模オフィスなどの比較的小さなオフィス空間においては、外部からの日射負荷や貫流熱負荷がペリメータゾーンだけでなく、インテリアゾーンにも広がりやすく、室全体にわたって温度むらができやすい。この問題を解決するためには室内の温度分布を予測することが重要となる。

そこでオフィス空間の温度分布を予測するモデルの作成を行い、CFD との比較によりその有効性を確認したので報告をする。

1.2 既往の研究

室内温度分布の予測については、従来から数多くの研究が行われてきた。数値解析による温度分布予測手法としては乱流モデルを用いた方法として村上・加藤ら^{文1)}、白石・相楽ら^{文2)}をはじめとして数多くの研究が行われており、その有効性が実証されている。しかし、ミクロ的な解析は計算負荷が非常に大きく通常のコンピュータでは実施できず誰もが扱える解析手法となっていない。

一方、空間を上下方向に複層分割し、層間の空気移動を評価して上下温度分布を予測するマクロ的な解析手法についても数多く提案されている^{文3)~5)}。

例えば、戸河里ら^{文3)、4)}は大空間に形成される上下温度分布を簡易に予測するためのモデルの作成を行っている。大空間では水平温度が均一になりやすいという経験的な事実から、対象空間を上下方向のみに分割するモデルである。特徴としては、壁面に沿う下降流（または上昇流）を表現する「壁面流モデル」、空調吹出気流を自由噴流として扱い、その影響を評価する「非等温噴流モデル」、空間内の上部と下部の温度差に起因する熱移動を評価する「熱移動係数 Cb」の導入がなされていることなどが挙げられる。実験値との比較により実用十分な予測精度を有することが示されている。しかし、大空間を前提としたモデルであることや吹出気流を自由噴流として解析を進めていることからオフィス空間に対してそのまま適用する事は難しいと考えられる。

また、伊藤・横井・中原^{文5)}は一般居室の暖房を対象とした上下温度分布予測モデルを提案している。室内を吹出気流が完全拡散される完全混合域と、下向き方向の一元的な空気の移流および熱拡散が起こるピストンフロー

域に分け、上下温度分布を予測するものである。実験結果ともよく一致しており、手法として参考となるが、暖房時についてのみ解析であることや、床吹出し空調などの居住域空調について検討されていない点などが問題として挙げられる。

以上のような研究を参考にしうえて、一般オフィスを対象とした温度分布簡易予測モデルの開発を行う。

2. 温度分布簡易予測モデルの作成方法

2.1 モデルの概要

一般に温度予測には次の温度輸送方程式を用いる。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{\partial T \cdot U_i}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ (a + a_i) \frac{\partial T}{\partial x_i} \right\} + \frac{S}{C_p \rho} \dots \dots (1)$$

T : 絶対温度[K] t : 時間[s] U : 平均流速[m/s] x : 座標[m]

a : 温度伝導率[m²/s] a_i : 乱流熱拡散係数[m²/s]

S : 発熱量[J/s・m³] C_p : 容積比熱[J/m³・K]

左辺第1項（時間項）は時間による温度変化、右辺第1項（移流項）は平均流速により温度が運ばれる現象、右辺第2項（拡散項）は乱流熱拡散の度合で温度が室内に広がる現象を示す。また、右辺第3項（生成項）は単位時間当たりの温度発生率を表している。

本来、式(1)から温度を求めるには風速と乱流熱拡散係数を別途算出しなければならないが、今回提案するモデルでは風速と乱流熱拡散係数をあらかじめ定めることで簡易に計算できるようにする。

2.2 研究手法

1) CFD を用いたオフィス空間の解析

吹出口、風量などを変更した複数ケースで CFD 解析。

2) 解析結果の整理と比較

CFD 解析の結果から流れ場および拡散度合のパターン化。

3) 温度分布予測モデルの構築

式(1)による数値モデルの作成。風速分布及び乱流熱拡散係数は2)で算出したものを使用。

4) 精度検証

CFD との比較による妥当性の検証。

3. CFD を用いたオフィス空間の解析

3.1 解析空間

図1に解析空間を示す。3.6m×3.6m を1つのモジュールとして構成された一般オフィス（幅 10.8m(x)×奥行

3.6m(z) × 高さ 2.6m(y) の一区画を想定する。ただし、X 軸に平行な面（東西面）は対称面である。空間内には、流れ場に影響を与える人体やデスクなどを再現した。

空調の吹出方式は天井吹出と床吹出の2種類とし、天井吹出はパン型、床吹出は旋回流式を想定する。パン型は吹出気流が天井面を這うような開口条件を設定した。また、旋回流式は吹出口を4分割し、吹出方向をそれぞれ変えることで再現した。どちらの吹出口も K 社のカタログを参考に作成し、概ねカタログ値を達成している。

3.2 解析条件と解析ケース

表 1 に解析条件を示す。移流項差分スキームは QUICK、乱流モデルは標準 k-ε モデルを使用し、全ケースにおいて定常解析を行った。

表 2 に解析ケースを示す。吹出口の種類、室レイアウト、吹出風量、ブラインド使用の有無（負荷の大小）、吹出温度をそれぞれ変化させた 12 ケースを検討した。

4. 解析結果の整理と比較

4.1 モデル化に向けた整理

対象空間を X 軸に 6 分割、Z 軸に分割なし、Y 軸に 5 分割したものを想定し、分割された各々の領域の平均温度を算出できるものを目指す。そのため、CFD の結果をモデル化に向けて平均処理する必要がある。風速は分割したブロックの界面の大きさ、乱流熱拡散係数はブロックのボリュームで平均を行った。概念図を図 2 に示す。

4.2 風速のパターン化

図 3 に、Case1-1、1-2、3-1、3-2 の気流性状を示す。

Case1-1 と 1-2 を比較すると両ケースの気流性状が似ていることを確認できる。また、Case1-3~2-4 も同様の結果

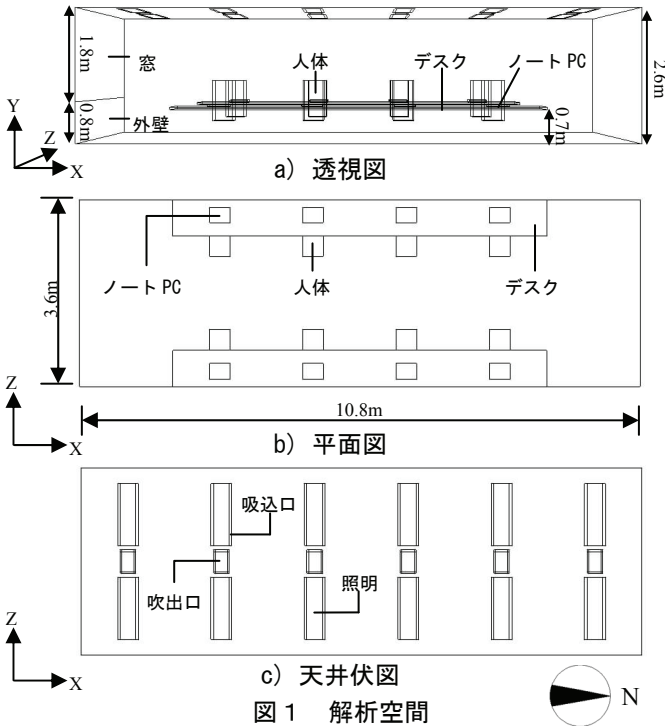


図 1 解析空間

となった。天井吹出では同じ吹出口形状であれば、風量の変化が流れ場に与える影響は小さいと考え、モデルでは Case1-1 の気流性状を利用する。また、ベクトルの大きさ（風速の大きさ）は、モデル計算時に使用する風量と気流性状の算出に利用した風量（この場合は Case1-1）の比で補正する。

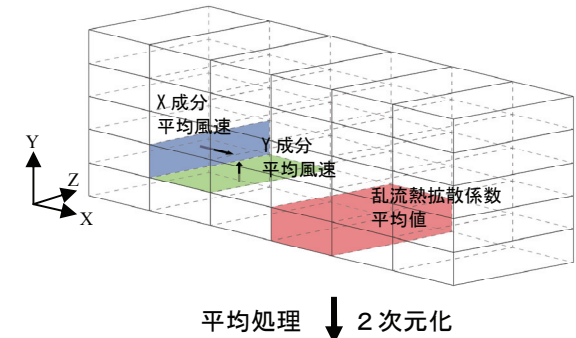
表 1 解析条件

解析領域	10.8m(x) × 3.6(z) × 2.6(y)	
メッシュ	1,035,440 (301 × 80 × 43)	
流入条件	$k_{in}=3/2(U_{in}+0.1)^2$ $\epsilon_{in}=C_{\mu} \cdot k_{in}^{3/2}/l$	
流出条件	$k_{out}=10^{-10}$ $\epsilon_{out}=10^{-10}$	
差分スキーム	QUICK	
乱流モデル	標準 k-ε モデル	
壁面境界条件	温度	南面は熱流による発熱、それ以外は断熱条件
	速度	東西面は対称条件、それ以外は対数則条件
発熱条件	窓面	1322W(基準ケース) 熱貫流+日射負荷
	壁面	16W
	照明	64W × 12セット
	人体	55W/人 × 8人
	OA機器	20W/m ² ノートPC30W × 8台を含む

U_{in} : 吹出風速[m/s], k_{in} : 吹出風の乱流エネルギー[m²/s²], ϵ_{in} : k_{in} の散逸率[m²/s³]
 C_{μ} : モデル定数(=0.09), l : 吹出代表長さ[m](吹出口の短手方向の長さ)
 発熱条件の値はすべて物体の表面に熱流として与える。OA機器についてはノートPCを除き、すべて床面に与えた。

表 2 解析ケース

ケース	吹出口	吹出温度 (°C)	デスクレイアウト	ブラインドの有無	吹出風量 (m ³ /h)
1-1	天井吹出 (パン型)	16	両端	×	993.6
1-2				○	828
1-3				○	662.4
1-4				○	993.6
2-1			中心	×	993.6
2-2				×	828
2-3				○	662.4
2-4				○	993.6
3-1	床吹出 (旋回流式)	18	両端	×	1238.4
3-2				×	1032
3-3				○	825.6
3-4				○	1238.4



ブロック1.5	.	.	.	.	ブロック6.5
.
.
X成分風速	.	.	.	.	.
ブロック1.1	Y成分風速	.	乱流熱拡散係数	.	ブロック6.1

図 2 平均化の概念

Case3-1 と Case3-2 を比較すると両ケースの気流性状は似ていない。また、Case3-3 についても同様の結果となったが、Case3-4 については同風量の Case3-1 と似た性状を示した。このことから、床吹出は浮力の影響を受けやすく、風量の違いで気流性状が大きく変化すると考えられる。モデルでは、入力された風量に応じて Case3-1、Case3-2、Case3-3 の 3 種類の気流性状を切り替えて利用する。また、ベクトル大きさは、天井吹出のケースと同様の考え方で補正する。

4.3 乱流熱拡散係数のパターン化

図 4 に Case1-1、1-3、3-1、3-2 の乱流熱拡散係数の値を示す。Case1-1 と 1-2 では全体の平均値に有意差は見られなかったが、Case1-1 (天井吹出) と 3-1 (床吹出) の比較では有意差があった。また、Case3-1 と 3-2 の比較についても有意差があった。このことから違いではなく気流性状の違いが乱流熱拡散係数に大きな影響を及ぼしていると考えられる。よって、モデルでは乱流熱拡散係数は風速の場合と同じ、Case1-1、3-1、3-2、3-4 の 4 つのパターンを切り替えて利用する。また、風量による乱流熱拡散係数の補正は行わないものとする。

5. 温度分布予測モデルの構築

5.1 モデル構築のための離散化

式(1)に従い、2次元モデルの作成を行う。本モデルは定常解を対象としているため、 $\partial T / \partial t = 0$ として取り扱う。

2次元モデルであることを考慮し、式(1)を以下のように書き換える。

$$\frac{\partial T \cdot U}{\partial x} + \frac{\partial T \cdot V}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left((a + a_i) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left((a + a_i) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{S}{C_p \rho} \dots \dots \dots (2)$$

式(2)の左辺は移流項、右辺は拡散項および生成項を表している。それぞれの項を有限体積法により離散化する。離散化式は次頁にまとめる。

5.2 モデル計算の流れ

図 5 に計算フローを示す。

- 初期条件として室内負荷、吹出温度、風量等を入力。
- 風速および乱流熱拡散の代表値を補正。
- ブロック空気温度の仮定。初期温度は目標設計温度。
- 各ブロックの熱収支式を連成して解くことでブロック温度 T_p を算出。
- 収束しなかった場合、c)へ戻る。ブロック温度 T_p が大よそ変化しなくなったとき、収束したものとする。

5.3 モデルのチューニング^{注1)}

分割ブロックの大きさが原因となり、算出温度が CFD よりも高くなる傾向にある。そこで、算出される結果が比較的近くなるようにモデルをチューニングした。

6. 精度検証

図 6 にモデルと CFD の算出結果を示す。風速および乱流熱拡散係数は 4.2、4.3 の方法に従って与えた。

全ケースで比較的 CFD に近い値を示した。Case1-1 の結

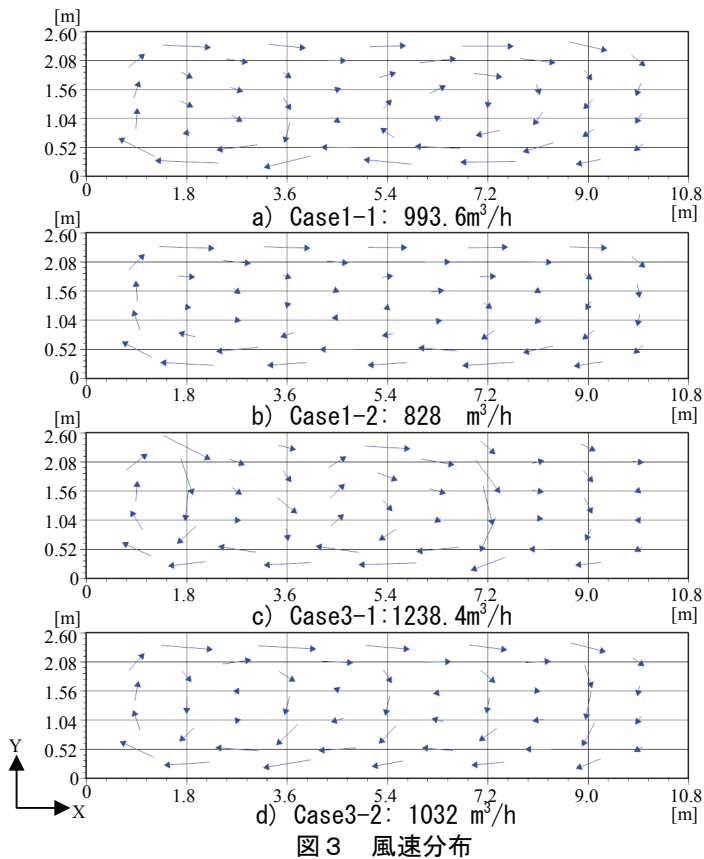


図 3 風速分布

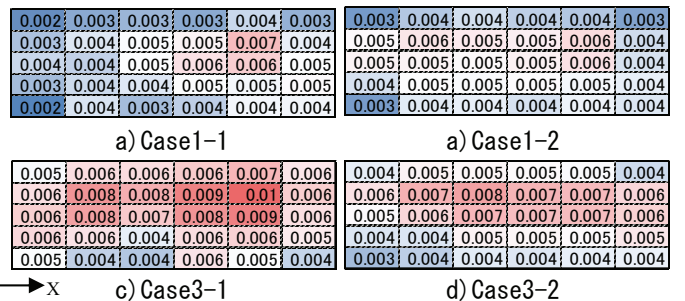


図 4 乱流熱拡散係数の分布 (単位: m²/s)

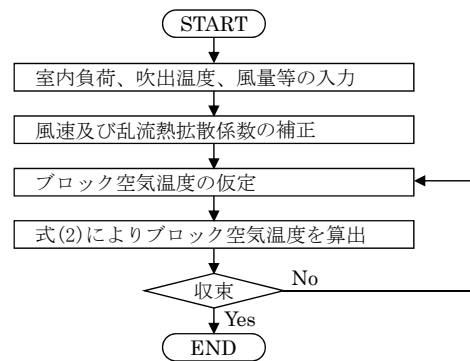


図 5 計算フロー

果はチューニング^{注1)}の影響によるところが大きいが、風量を補正した Case1-2 でも比較的良好な結果となった。天井吹出は吹出風量が実用の範囲内であればモデルを活用できる可能性が示された。Case3-1、3-2 では気流性状の違いから、チューニングを別々に行ったため、風量を変えた場合にも有効な結果が出るかを確認できない。床吹出については今後も引き続き検討する必要がある。

7. まとめ

以下に、本研究で得られた知見をまとめる。

- a) 天井吹出の気流性状は吹出風量の違いによる影響は小さいが、床吹出では大きな影響を及ぼす。
- b) 乱流熱拡散係数は気流性状ごとにパタン化が可能。
- c) パン型の吹出風量が実用範囲であればモデルは有効に働く可能性がある。床吹出はさらなる検討が必要。今後の課題としては、窓面以外の負荷を変更したケースの検討や床吹出の風量を変えたケースの追加検討 (ex. Case3-1 と 3-2 の中間の風量) 等を実施する必要がある。

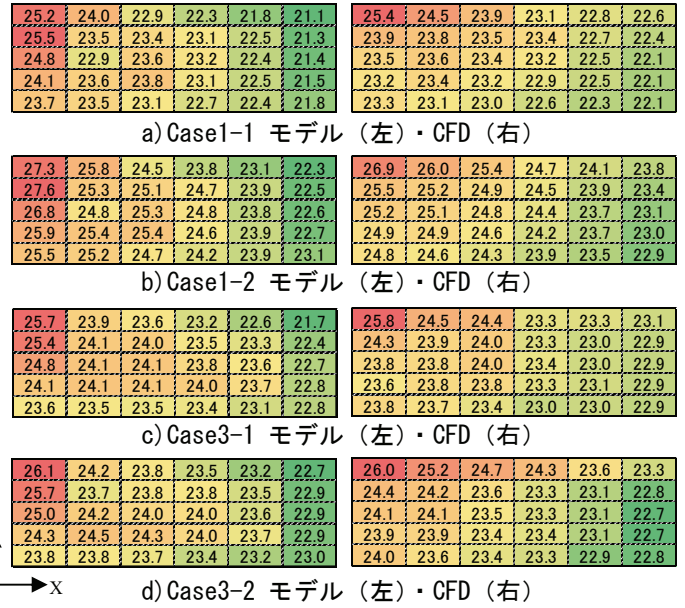


図6 モデルの計算結果 (単位: °C)

離散化式

左辺 (移流項) 第1項 $\iint \frac{\partial U \cdot T}{\partial x} dx dy = \Delta y \int \frac{\partial U \cdot T}{\partial x} dx$ 境界点の値 T_e や T_w は上流側の値をそのまま利用する。例えば以下のように。
 $= \Delta y (U_e \cdot T_e - U_w \cdot T_w)$ $U_e > 0$ のとき $T_e = T_P$
 $U_e < 0$ のとき $T_e = T_E$

左辺 (移流項) 第2項 $\iint \frac{\partial V \cdot T}{\partial y} dx dy = \Delta x \int \frac{\partial V \cdot T}{\partial y} dy$
 $= \Delta x (V_n \cdot T_n - V_s \cdot T_s)$

右辺 (拡散項) 第1項 $\iint \frac{\partial}{\partial x} \left((a + a_t) \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dy = \Delta y \int \frac{\partial}{\partial x} \left((a + a_t) \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx$
 $= \Delta y \left\{ \left((a + a_t) \frac{\partial T}{\partial x} \right)_e - \left((a + a_t) \frac{\partial T}{\partial x} \right)_w \right\}$
 $= \Delta y \left\{ (a + a_t) \frac{1}{\Delta x} (T_E - T_P) - (a + a_t) \frac{1}{\Delta x} (T_P - T_W) \right\}$

右辺 (拡散項) 第2項 $\iint \frac{\partial}{\partial y} \left((a + a_t) \frac{\partial T}{\partial y} \right) dx dy = \Delta x \int \frac{\partial}{\partial y} \left((a + a_t) \frac{\partial T}{\partial y} \right) dy$
 $= \Delta x \left\{ \left((a + a_t) \frac{\partial T}{\partial y} \right)_n - \left((a + a_t) \frac{\partial T}{\partial y} \right)_s \right\}$
 $= \Delta x \left\{ (a + a_t) \frac{1}{\Delta y} (T_N - T_P) - (a + a_t) \frac{1}{\Delta y} (T_P - T_S) \right\}$

右辺 (生成項) 第3項 $\iint \frac{S}{C_p \rho} dx dy = \Delta x \cdot \Delta y \cdot \frac{S}{C_p \rho}$

記号の説明

U : 平均流速のX成分[m/s] V : 平均流速のY成分[m/s]
 x : 座標[m] y : 座標[m] T : 絶対温度[K]
 Δx : X方向の格子幅[m] Δy : Y方向の格子幅[m]
 a : 温度伝導率[m²/s] a_t : 乱流熱拡散係数[m²/s]
 S : 発熱量[J/s・m³] $C_p \rho$: 容積比熱[J/m³・K]

※式中の添え字については図7を参照

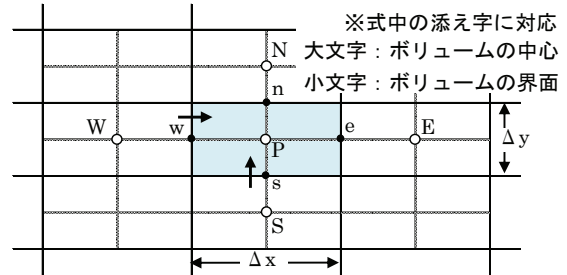


図7 コントロールボリュームと界面

注釈

注1) モデルでは窓面から1.8mの範囲まで日射負荷が均等に与えられるため、室全体の温度が高くなる。ブロック 2.1~2.5 (図2参照) への左側からの流入風量を1~2割小さく見積もり、空調の吹出・吸込風量は通常の1.2倍とした。チューニングは各気流性状(4ケース)で行った。

参考文献

- 文1) 村上、加藤他: 乱流数値解析による室内対流熱伝達に関する研究(その1)~(その3)、日本建築学会大会学術講演梗概集、(1990-10)、pp.479-484
- 文2) 平川、白石他: 空調システムシミュレーションとCFDの連成解析による空調性能シミュレータに関する研究 第1報 シミュレータの概要及びオフィス空間を想定した定常実験による予測精度の検証 空気調和・衛生工学会論文集、No.170(2011-5)、pp.1-9
- 文3) 戸河里、荒井、三浦: 大空間の空調・熱環境計画手法(その1) 大空間における上下温度分布の予測モデル、日本建築学会計画系論文報告集、No.427(1991-9)、pp.9-19
- 文4) 戸河、荒井、三浦: 大空間の空調・熱環境計画手法(その2) 大空間における上下温度分布予測のための非定常計算モデル、日本建築学会計画系論文報告集、No.435(1992-5)、pp.11-21
- 文5) 伊藤、横井、中原: 温風暖房空間の上下温度分布の簡易計算モデル 空調空間の熱的特性に関する研究 第2報、日本建築学会計画系論文報告集、No.398(1989-4)、pp.59-67