

CFDによる自然対流を伴う工場内の気流性状の予測に関する研究

建築環境工学分野 正願地寛

1. はじめに

換気システムの最適化を行うには、設計者は様々な設計パラメーターの変更が室内環境に与える影響を具体的に把握しておく必要がある。しかし、一般に室内の気流性状は均一でないことが多く、その予測は容易ではない。室内の流れの基礎方程式を数値的に解くCFD（数値流体力学）は、実験を除けば、三次元で詳細な室内気流の予測・解析法としては唯一のものであり、室内環境の合理的設計を行う上で重要な情報を与える。

本研究は、高温工場内の換気による気流性状を把握するため実測及びCFDによる数値解析を行い、自然給気開口での流入出や、システムの最適条件を検討することを目的とした。

2. 実測

2-1 測定対象の概要

対象工場の概観を図1に示す。図に示すa~mは発熱体である。工場は第3種機械換気を適用しており、E1~E5が強制排気で、開口A~D、及びS1~S4が自然給気開口である（送風機容量：1340m³/min）。

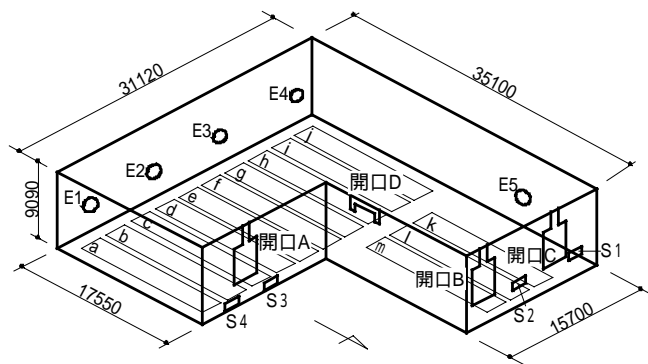


図1 工場の概観

2-2 測定概要

2003年8月23、24日に実測を行った。測定項目は工場内外の温度及び、開口部の気流状態（温度・速度・方向）である。温度及び気流の測定位置を図2、3に示す。気温の鉛直方向の測定点は、1.45mから0.88mピッチで9点設置した。実測は開口A~Dが全部閉じた条件（close）開口A及びDを開放した条件（A+

D）開口C及びDを開放した条件（C+D）の3条件について行った。

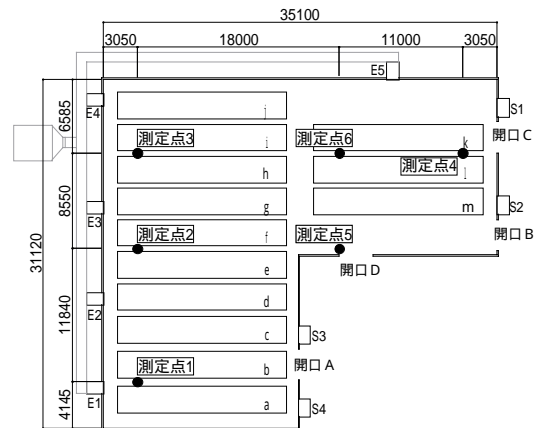


図2 温度の水平方向の測定点

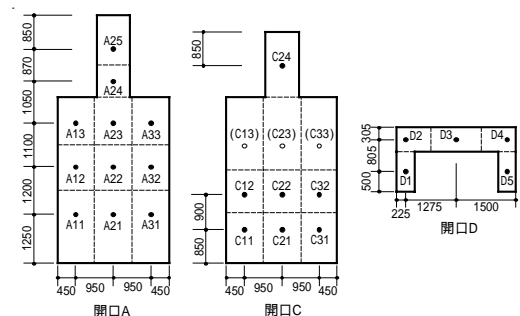


図3 開口A、C、Dの気流測定点

2-3 測定結果

1) 温度の測定結果

各条件での工場内外の平均温度を表1に、測定結果の一例として、測定点6の温度の測定結果を図4に示す。図4より、開口が閉じている場合、工場内の垂直温度分布は3以内で比較的均一であるが、開口が開いた場合、開口部付近では床面付近の温度が低下する。このことから、開口から工場内に流入した空気は工場内の空気より温度が低いいため、浮力の影響により下降すると考えられる。

表1 各条件での平均温度

条件	平均温度[]
close条件	35.65
A+D条件	33.29
C+D条件	32.70
工場外気温	28.89

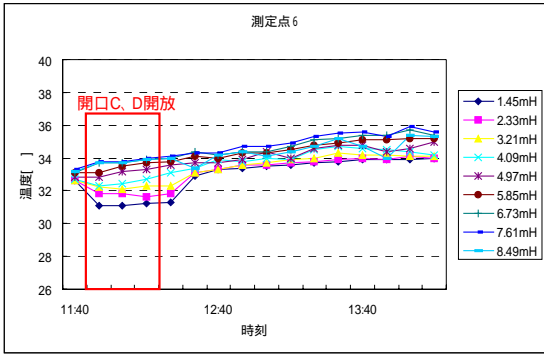


図4 測定点6の温度測定結果

2) 気流の測定結果

各条件での開口での風速測定結果を図5に、給排気口での気流状態を表2に、風量収支を表3に示す。図5より、開口での風速は開口上端部で比較的小さくなる。表3より、C + D条件の風量収支の差がかなり大きい。これは開口Cに関しては十分な測定点を設けることができなかったためである。また、排気風速は排気口によって異なり(表2)、測定排気量は送風機容量の6~8割程度であった。これは測定誤差の他に、ダクト系での圧力損失が原因であると考えられる。

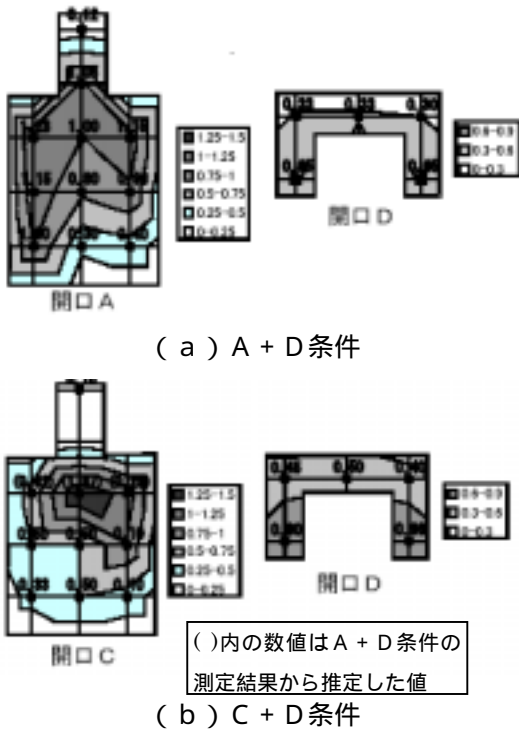


図5 各条件での開口での風速測定結果

表2 各条件での給排気口での気流状態

種類	開口名称	close			A+D			C+D		
		温度[°C]	速度[m/s]	方向	温度[°C]	速度[m/s]	方向	温度[°C]	速度[m/s]	方向
機械排気	E1	37.2	3.08	out	32.1	3.90	out	32.7	4.09	out
	E2	36.3	3.62	out	32.2	3.05	out	32.2	4.86	out
	E3	35.4	3.65	out	32.8	3.91	out	31.9	4.24	out
	E4	35.1	2.45	out	33.0	2.95	out	32.3	3.04	out
	E5	35.7	3.20	out	33.5	3.89	out	32.0	3.93	out
自然給気	S1	35.5	1.40	in	35.2	0.15	in	33.0	0.15	in
	S2	36.3	1.20	in	35.4	0.17	in	32.7	0.15	in
	S3	37.5	3.90	in	37.8	0.30	in	36.1	0.32	in
	S4	37.5	1.50	in	34.5	0.23	in	35.4	0.23	in

表3 各条件での風量収支

種類	開口	close		A+D		C+D	
		風量[m³/s]		風量[m³/s]		風量[m³/s]	
排気	E1~E5	-13.85		-16.10		-17.45	
	S1~S4	12.80		1.36		1.36	
給気	-	-		開口A	10.75	開口C	7.11
	-	-		開口D	1.21	開口D	1.77
	総給気量	12.80		総給気量	13.32	総給気量	10.24
計	-	-1.05		計	-2.78	計	-7.21

3) 熱収支

総給気量を総排気量に合わせ給排気量のバランスをとり、各条件での熱収支を求めた。これを表4に示す。熱が入ってくる方を+、出て行く方を-で表す。A + D、C + D条件に関しては出て行く方が多い。測定時、熱的に平衡状態にあったとすれば、熱収支のマイナス分がそのまま発熱体の総発熱量となる。close条件についても同様の傾向になるはずであるが、熱収支は逆転している。これは、測定に誤りがあったか、押さえきれてない給気があった可能性が考えられる。

表4 各条件での熱収支

位置		close		A+D		C+D	
		風量[m³/s]	熱量[kcal/h]	風量[m³/s]	熱量[kcal/h]	風量[m³/s]	熱量[kcal/h]
排気	E1~E5	-13.85	-516337	-16.10	-545828	-17.45	-682763
給気	S1~S4	13.85	530778	1.64	61269	1.95	71210
給気(修正値)	開口A or C	-	-	12.99	387544	12.41	382535
	開口D	-	-	1.46	45016	3.08	93128
天井・壁面	-	-	-8459	-	-4734	-	-4099
計		0	7167	0	-56733	0	-39979

3. 数値解析

3-1 数値解析の概要

1) 解析モデル

A + D条件、C + D条件について実測データを用いて数値解析を行った。A + D条件の解析モデルを図6に示す。工場の壁と天井は厚みのないパネルとし、熱貫流率を設定した。また、本解析では同一の開口で流入、流出が同時に生じる場合を考慮し、外部空間も解析領域に含めた。外部空間の解析境界は開口から十分遠方に設け、境界の全圧が0(大気圧)になるように設定している。要素数はA + D条件が264,600、C + D条件は270,720である。

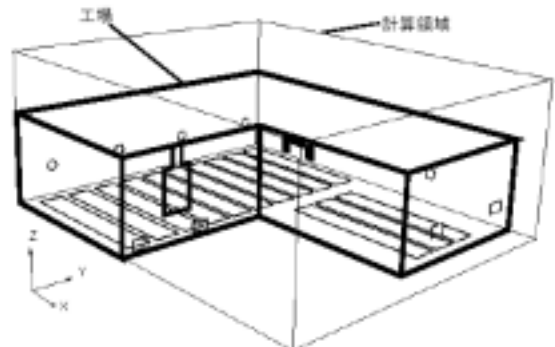


図6 A + D条件の解析モデル

2) 解析条件

境界条件を表5に、発熱条件を表6に示す。給排気口の境界条件はA + D条件及びC + D条件の測定データを用いた(表2)。また、壁面、天井の熱伝導率は壁面、天井を構成する材質から算出した。発熱条件は、総発熱量(表4)を各発熱体の表面温度と工場内の温度差の比で配分して与えた。計算上の初期条件はclose条件の測定データ(表2)を用いた。これを表7に示す。また、数値解析は非定常解析で行った。開口が完全に開いた状態から解析をスタートし、約60秒後まで計算を行った。

表5 境界条件

流入流出条件	吸込み口[m/s]	A+D	E1:3.90	E2:3.65	E3:3.91	E4:2.95	E5:3.89
		C+D	E1:4.09	E2:4.86	E3:4.24	E4:3.04	E5:3.93
	吹出し口[m/s]	A+D	S1:0.15	S2:0.17	S3:0.30	S4:0.23	
		C+D	S1:0.15	S2:0.16	S3:0.32	S4:0.23	
外気解析境界	全圧規定:0[Pa](大気圧)						
壁面熱移動条件	壁、天井	熱伝導率:0.6214[W/m·k]					
壁面熱移動条件	発熱体	温度の対数則					
壁面応力条件	壁、天井	対数則					

表6 発熱条件

発熱体	表面温度[]	発熱量[W]	
		A + D	C + D
a, b	60	75644	53306
k	48	37822	26653
d, e, f, g, j	39	9455	6663
c, h, i, l, m	常温	0	0

表7 初期条件

室内温度[]	36
外部温度[]	29
外部圧力[Pa]	0
室内圧力[Pa]	-30

3 - 2 実測と数値解析の比較

1) 数値解析結果

解析結果の一例として、開口Aの中央断面での風速ベクトルの解析結果を図7に示す。開口から流入した空気は、工場内の空気より温度が低いので浮力の影響により下降し、床面に向かう。

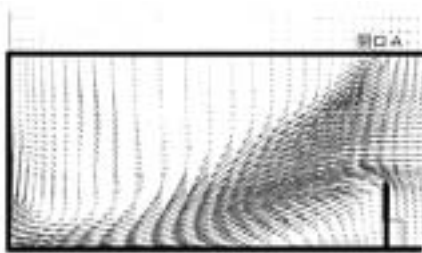
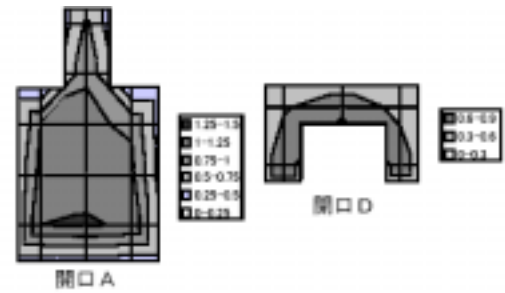


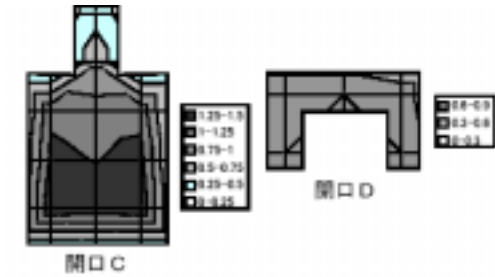
図7 開口A中央断面での風速ベクトル解析結果

2) 開口での風速分布の比較

数値解析の開口での風速分布を図8に示す。図5、8より、A + D条件において実測と数値解析の分布の形状は、開口Dに関してはよく一致している。開口Aに関しては、実測では開口の幅の広い部分の上方に風速が強い部分があるのに対し、数値解析では開口の幅の広い部分で逆の傾向を示している。だが、開口の風速分布で実測と数値解析は概ね一致しているといえる。C + D条件において、開口Dでは実測と数値解析はよい一致を示すが、開口Cでは測定点の数が少ないため比較は難しいが、一致はよくなかった。



(a) A + D条件



(b) C + D条件

図8 各条件での開口での風速解析結果

3) 温度分布の比較

C + D条件での各測定点の垂直温度分布の実測結果と解析結果を図9に示す。ここで示す解析結果は定常解析の結果である。図9より、温度分布の解析結果は実測と概ねよい一致を示した。しかし、壁面への衝突や流れの混合により、流れの方向が変わるような複雑な気流性状を示す領域では(測定点3、5、6)実測と数値解析の一致はあまりよくない。A + D条件でも同様の傾向がみられた。

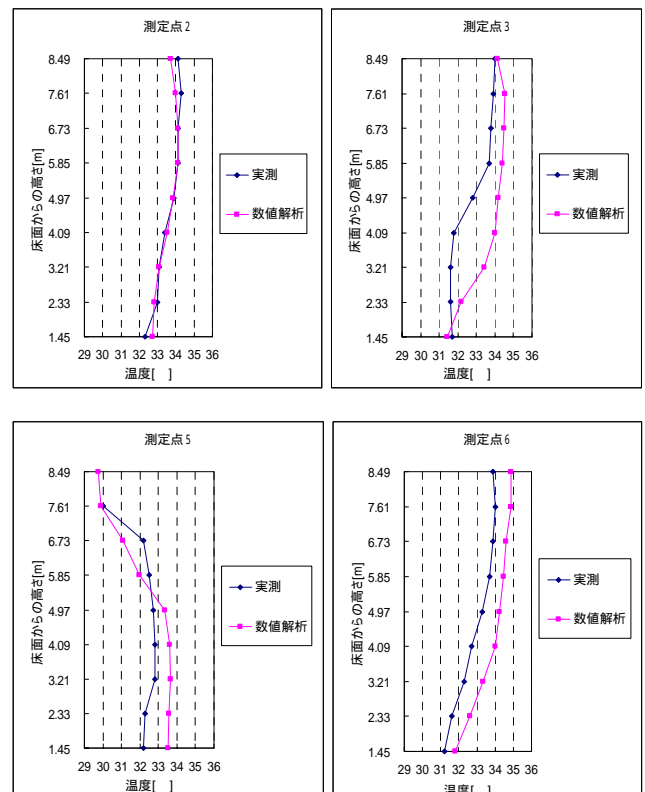


図9 C + D条件での温度分布の比較

3 - 3 システムの比較検討

1) シミュレーション概要

排気風量や、排気口の高さ、設置数を変化させた場合の気流性状の把握と最適条件の検討のためにシミュレーションを行った。各排気口 (E1 ~ E5) の境界条件は風量を均等に配分して与える。開口の開閉条件は A + D 条件、C + D 条件である。シミュレーションは以下の手順で行う。

- (1) 風量を変化させ、開口で逆流が生じない (工場外へ空気が流出しない) 最小風量を求める。
- (2) 逆流が生じない最小風量のもとで、排気口の高さと設置数の変化を組み合わせた計 17 パターンについて数値解析を行う。代表的なパターンを図 10 に示す。

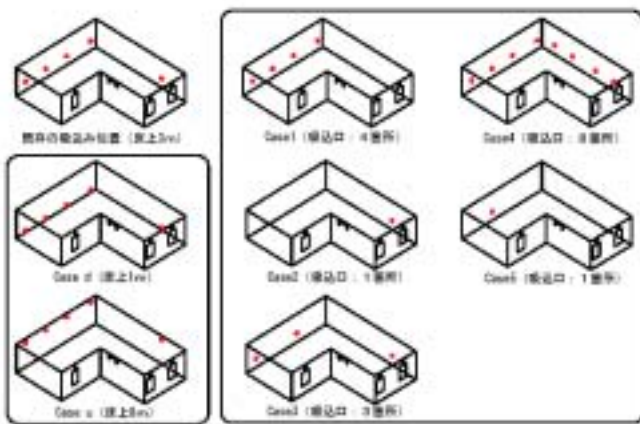


図 10 シミュレーションパターン

2) 排気風量を変化させた場合

逆流が生じない最小風量は A + D 条件が 40,000m³/h、C + D 条件が 41,500m³/h である。開閉条件による風量の違いは、C + D 条件では開口 C、D からの流れが流入直後に混合し、流れの風速が強くなり排気効率が悪くなるためであると考えられる。それに比べ、A + D 条件では開口 A、D からの流れは混合される前に別々に排気される。

3) 排気口の高さと設置数を変化させた場合

シミュレーション結果を表 8、9 に示す。表 8、9 より、A + D 条件、C + D 条件ともに、排気口の高さが天井に近くなれば、逆流しやすくなり、床面に近くなれば逆流しにくくなる傾向がある。開口の高さが変化しても、浮力の影響が強いため、開口からの流れは下降し、床面に向かう。そのため、排気口を床面付近に設置した方が効率はよくなると考えられる。しかし、排気口の高さの変化による開口付近の解析結果の変化はごく僅かであり、詳細な原因の究明は困難であった。

排気口の設置数を変化させても特別な傾向が認められず、逆流の起こりやすさは排気口の設置数よりも開口と排気口の位置関係に依存すると考えられる。

表 8 A + D 条件のシミュレーション結果

パターン	逆流	風量[m ³ /h]	備考
case d	なし	40,000	吸込口の高さ: 床上1m
case u	あり	40,000	吸込口の高さ: 床上8m
case1	Aのみ	40,000	吸込口の数: 4箇所 (C,D付近なし)
case2	なし	40,000	吸込口の数: 1箇所 (C,D付近のみ)
case3	なし	40,000	吸込口の数: 3箇所 (4 2)
case4	なし	40,000	吸込口の数: 8箇所 (C,D付近も4個)
case5	なし	40,000	吸込口の数: 1箇所 (4 1)
case1 d	なし	40,000	数: 4箇所 (C,D付近なし) 高さ: 床上1m
case1 u	あり	40,000	数: 4箇所 (C,D付近なし) 高さ: 床上8m
case2 d	なし	40,000	数: 1箇所 (C,D付近のみ) 高さ: 床上1m
case2 u	あり	40,000	数: 1箇所 (C,D付近のみ) 高さ: 床上8m
case3 d	なし	40,000	吸込口の数: 3箇所 (4 2) 高さ: 床上1m
case3 u	あり	40,000	吸込口の数: 3箇所 (4 2) 高さ: 床上8m
case4 d	なし	40,000	吸込口の数: 8箇所 (C,D付近も4個) 高さ: 床上1m
case4 u	あり	40,000	吸込口の数: 8箇所 (C,D付近も4個) 高さ: 床上8m
case5 d	なし	40,000	吸込口の数: 1箇所 (4 1) 高さ: 床上1m
case5 u	あり	40,000	吸込口の数: 1箇所 (4 1) 高さ: 床上8m

ありはA、D両方から逆流ありを表す

表 9 C + D 条件のシミュレーション結果

パターン	逆流	風量[m ³ /h]	備考
case d	なし	41,500	吸込口の高さ: 床上1m
case u	Cのみ	41,500	吸込口の高さ: 床上8m
case1	なし	41,500	吸込口の数: 4箇所 (C,D付近なし)
case2	なし	41,500	吸込口の数: 1箇所 (C,D付近のみ)
case3	なし	41,500	吸込口の数: 3箇所 (4 2)
case4	なし	41,500	吸込口の数: 8箇所 (C,D付近も4個)
case5	なし	41,500	吸込口の数: 1箇所 (4 1)
case1 d	なし	41,500	数: 4箇所 (C,D付近なし) 高さ: 床上1m
case1 u	Cのみ	41,500	数: 4箇所 (C,D付近なし) 高さ: 床上8m
case2 d	なし	41,500	数: 1箇所 (C,D付近のみ) 高さ: 床上1m
case2 u	なし	41,500	数: 1箇所 (C,D付近のみ) 高さ: 床上8m
case3 d	なし	41,500	吸込口の数: 3箇所 (4 2) 高さ: 床上1m
case3 u	Cのみ	41,500	吸込口の数: 3箇所 (4 2) 高さ: 床上8m
case4 d	なし	41,500	吸込口の数: 8箇所 (C,D付近も4個) 高さ: 床上1m
case4 u	Cのみ	41,500	吸込口の数: 8箇所 (C,D付近も4個) 高さ: 床上8m
case5 d	なし	41,500	吸込口の数: 1箇所 (4 1) 高さ: 床上1m
case5 u	なし	41,500	吸込口の数: 1箇所 (4 1) 高さ: 床上8m

4. 結論

本研究では、高温工場の実測と数値解析を行い、工場内の気流性状を把握し、開口から逆流が生じない排気システムの最適条件の検討を行った。その結果、以下の知見を得た。

- 1) 開口から流入した空気は、排気口の高さに関係なく浮力の影響によりすぐに下降しはじめ、床面に沿った流れとなる。
- 2) 実測と数値解析を比較した結果、開口での風速分布と工場内の温度分布で概ねよい一致を示した。
- 3) 排気風量を変化させて数値解析を行った結果、開口で逆流が生じない最小風量は 41,500m³/h であった。
- 4) 開口で逆流が生じにくくなるのは、排気口の高さが床面に近い場合である。
- 5) 開口での逆流は、排気口の設置数に直接影響を受けず、むしろ開口と排気口の位置関係が重要であると考えられる。今後は位置関係を考慮に入れたパターンについて検討していく必要がある。

<参考文献> 1) 加藤信介: 数値流体力学 CFD の応用 (1), CFD による室内環境解析の概観, 空気調和・衛生工学, Vol.71, No.6, pp.59-67 (1997)・2) 空気調和・衛生工学会: 空気調和衛生設備計画・設計の実務と知識 (1995), オーム社