

熱影響を考慮した空調制気口配置計画の最適化に関する研究

A study on Optimization of layout plan for Air Inlet/Outlet with consideration of heat affect

J07115-7 山口 紘平

Abstract

Simulations based on Computational Fluid Dynamics (CFD) have been widely used as analysis tools for ventilation characteristics. However, the CFD can only be applicable to optimization of air inlet/outlet layout for simple-shape rooms because the amount of calculation for CFD is large. Our laboratory has proposed a method for finding an optimal layout by using genetic algorithm (GA) and has applied to analysis of air-flow properties in office-building corridors and to optimal designs. This study newly evaluates CFD simulations considering heat-affect and demonstrates the feasibility of reducing calculation amount of 96% or more.

Keywords : 室内空気質(Indoor Air Quality)、廊下(Corridor)、空気齢(Air Age)、気流解析(Air-flow analysis)、遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm)、最適化 (Optimization)

1. 背景・目的

近年、空調設備の設計段階で数値流体力学 (CFD : Computational Fluid Dynamics) (以下、CFD と記す) に基づく解析手法を使用することが一般化している。但し、その使い方は空調設計者が立案した設計の中の部分的な不具合を解決するためといったものが多く、基本設計そのものは設計者の経験や一般論に頼る所が大きい。そのため、設計者が経験に基づき除外する設計について使用することは少ない。しかし、それらの中に優れている設計が存在する可能性は十分にある。特にこの様な傾向は経験や一般論が成立しにくい特殊な形状の室において、より顕著に表れると思われる。優秀な計画を見落とさないためには CFD を用いて定量的に換気特性を把握する必要があるが、設備因子の組み合わせは無数に存在し、それらすべての組み合わせに対して解析を行うことは困難である。そこで当研究室では設備因子のうちの吹出口配置に着目し、無数にある吹出口の組み合わせの中から最適な組み合わせを探索する組み合わせ最適化問題として扱う設計支援ツールを開発と検証を行ってきた。その結果、単純な解析領域の形状の場合¹⁾²⁾、及び複雑な形状⁴⁾においても熱を考慮しない場合において設計支援ツールの有効性を示すことができた。しかし、自然対流の発生など熱の気流性状に与える影響は大きく、より現実的な条件に近づけるためには熱影響の考慮が不可欠である。

したがって本研究では、複雑な解析モデルとして事務所ビルの廊下を対象とし、新たに熱影響を考慮して気流解析を行い、IAQ (Indoor Air Quality) に着目した定量把握に基づき、設計支援ツールの提案を行うことを目的とする。

事務所ビルの廊下は利用頻度が高いにも関わらず、滞在時間が短いことや非居住域であるため、その空調設計は軽視されがちである。そのため、臭いが長時間にわたり滞留するなどの問題が発生することがあり、利用者が快適に使うためにはこれらの問題を含む廊下の空気環境は改善する必要がある。また形状が複雑なものも多く、その換気特性

を把握する為には個別に流体解析手法などの特殊な手段が必要である

2. 研究手法

本研究では評価基準を空気齢、研究対象を事務所ビルの廊下とした。研究は大きく分けて2段階で構成されており、第1段階として廊下のモデル化を行い、定量的に換気特性の把握及び比較できる評価値を算出するため流体解析を行う。そして、解析結果から得られた評価値を基に空調吹出口の組み合わせによる換気特性の違い及び熱影響を考察する。第2段階として解析結果から得られた評価値を用いて設計支援ツールの有効性の検証と考察を行う。

2.1 空気齢

建築基準法では、IAQ に関わる基準としては室を単位とした必要換気量の設定のみがある。しかし、換気量による評価基準では局所的な空気の淀みを反映することはできない。そこで、本研究では廊下の換気特性を、局所的な空気の淀みも含め評価するために、換気効率指標 (SVE : Scale for Ventilation Efficiency) の考え方をを用いる。換気効率指標とは複雑な換気特性を定量的に把握するために提案された指標である。この換気効率指標の中に空気齢指標 (SVE3) がある。空気齢とは、任意の点 P を通過する全ての空気塊が点 P に到達するまでの平均の時間のことである。これは点 P での空気の新鮮度 (到達性) を示している。気齢は単位が時間であるため、感覚的に理解しやすい。空気齢の概念図を図1に示す。

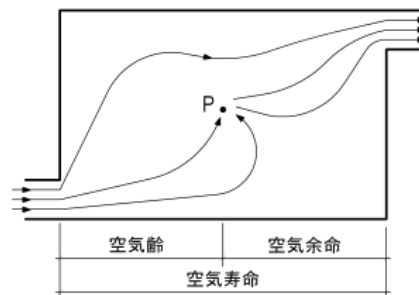


図1 空気齢の概念図

2.2 解析モデルと評価方法

廊下のモデル化では、実在の廊下を参考に廊下形状の決定と空調設備因子の設定を行う。過去の研究で用いられた中で最も吹出口配置の組み合わせの数が多かった中規模事務所ビル（MODEL-C）に熱要素を加え新たに作成する。

空調設備因子として、吹出風速、吹出温度、吸込風速、吹出口の数、吹出口の配置を設定した。吹出風速と吸込風速は、廊下全体の換気回数が約2回となるように設定する。

それ以外の熱因子として外気温度、照明の発熱を設定した。照明に関しては廊下の照度基準を満たすように

MODEL-Cの平面図及び空調因子である吹出口の配置候補場所を図2に示す。図中の「■」は吹出口の配置候補位置を、「×」はパスタクトの位置を、「→」は吹込み方向を示している。また、熱因子である照明及びガラスの位置を図3に示す。図中の「□」照明の位置、「=」がガラスの一になっている。表1に各モデルの概要を示す。

本研究では、廊下の評価値として空気齢下側累積頻度95%点（以下評価値）を用いることにする。工学として空気齢下側累積頻度95%点を使用することは一般的であることから適当であると考えられる。

2.3 解析方法及び解析条件

解析はクレイドル社のSTREAM version8を使用する。解析は定常状態になるまで行い、STREAMの標準機能を使って各モデルのSVE3を算出し、その後空気齢に変換して用いた。解析条件を表2に示す。

3 考察

本研究では、吹出口配置パターンを評価値により順位付けを行い空調吹出口配置による室の換気特性の影響について考察を行った。また、計算された空気齢を基に視覚的な確認の為に空気齢コンター図、気流ベクトル図および気流コンター図を作成し、吹出口配置による空気齢の違いを比較した。以下に考察の内容と結果を示す。

3.1 内容

吹出口配置パターンにおいて評価値順位上位・下位パターン、及び熱条件の違いによる影響について考察を行う。

上位・下位パターンについての考察では、パターン間で吹出口配置の共通項を見付けることにより、熱が気流性状に与える影響について考察を行う。

3.2 結果

図4に夏季と冬季の評価値の分布、表3に夏季と冬季の評価値の最大、最小、平均及び標準偏差を示す。横軸が評価値、縦軸が個数になっている。

図5にMODEL-Cの冬季時に最も良いパターンの制気口配置図及び空気齢コンター図を示す。図の空気齢コンター図は色が濃いほど新鮮な空気が行き届くまでに時間がかかっていることを表している。また、気流コンター図は色が濃い箇所ほど気流が強いことを表している。

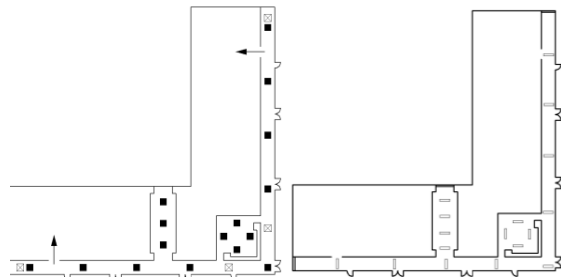


図2 空調因子配置図

図3 熱因子配置図

表1 各モデルの概要

MODEL-C				
廊下	床面積	213	m ²	
	高さ	2.8	m	
	容積	595.8	m ³	
	換気回数	1.9	回/h	
吹き出口	タイプ	ブリーズライン		
	サイズ	0.04×1.0	m	
	吹き出風速	0.71	m/s	
	吹き出し温度	夏季	26	°C
		冬季	22	°C
	相対湿度	夏季	60	%
		冬季	40	%
配置候補箇所数	16	箇所		
選択箇所数	11	箇所		
吸い込み口	サイズ	4.2	m ²	
	吸い込み風速	0.04	m/s	
	個数	2	箇所	
パスタクト	サイズ	0.3×0.3	m	
	個数	4	個	
	流入温度	夏季	26	°C
		冬季	22	°C
照明	タイプ	埋め込み型(蛍光灯2本)		
	サイズ	0.2×0.2	m	
	発熱量	41	W/m ²	
	個数	17	個	
	気温	夏季	30	°C
		冬季	10	°C
全体	目標温度	夏季	26	°C
		冬季	22	°C

表2 解析条件

気流の性状	乱流
乱流モデル	標準k-εモデル
乱流エネルギーk	0.0001
乱流消失率ε	0.0001
壁面の条件	対数則条件
ドア	密閉
ダクト	自由流出流入

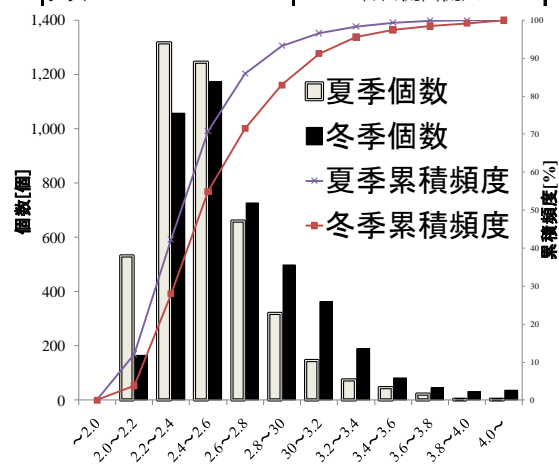


図4 夏季と冬季の評価値の分布

3.2 結果

まず、夏季と冬季の全体の傾向から見ていく。図4を見ると評価値分布は、夏季が全体的に評価の良いところで数が多くなっており、また、表3よりすべての値に関して夏季のほうが優れていることがわかる。これは本研究では床へ向かって強く吹き出すタイプの空調のため、冷房状態である夏季のほうが床を伝って素早く新鮮な空気が全体に広がったのだと考えられる。

次に各吹出口配置パターンの換気特性に与える影響について見ていく。表4-7をみると夏季と冬季でそれぞれの上位パターンと下位パターンで順位が等しい物はひとつもなく、大きく異なっていることがわかる。つまり、単純に夏季のほうが良い評価値になっている訳ではなく、熱条件により気流性状が大きく異なり、優れた吹出口配置パターン自体が異なっているということである。特にC-2555は表4を見るとわかるように冬季時に最も優れた空調配置パターンであるが夏季時は全4368パターン中3678位と優れていない。図5を見るとわかるように夏季時は廊下の一部に空気の淀みが発生してしまっている。この空気の淀みができた部分の廊下断面の空気齢コンター図、気流ベクトル図及び気流コンター図を図6に示す。図6の夏季の断面気流コンター図を見ると、空気の淀みが発生している箇所の気流は非常に弱くなっており、空気の移動が殆ど無いことがわかる。それに対して、冬季時は断面気流ベクトル図と気流コンター図からわかるように室の高低に一定方向の気流ができており、新鮮な空気が素早く室全体に行き渡っている。

夏季と冬季に対し、評価値順位上位・下位パターン及び平面計画について考察を行い、比較した結果

- ・熱条件によって室内の気流性状は大きく異なり、一年を通じて同様の吹出口を利用する場合は注意が必要である。

ということが分かった。

以上のように熱条件により気流性状が大きく異なることが確認できた。このような場合、感覚的に換気特性を把握することが困難であり、CFDを用いた換気設計の有効性を示すことができたといえる。

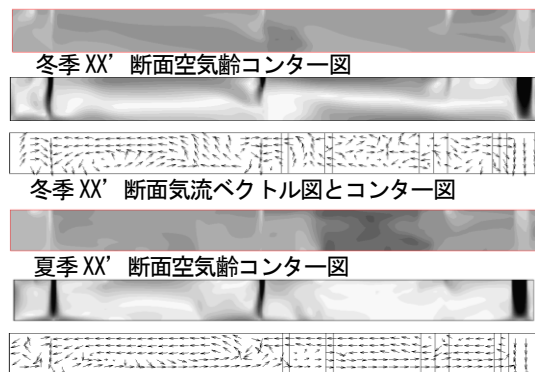


図6 C-2555の夏季と冬季のXX'断面図各種

表3 評価値の最大、最小、平均、及び標準偏差

モデル名	最大値	最小値	平均値	標準偏差
MODEL-C(夏季)	4173.99	2015.81	2503.08	300.09
MODEL-C(冬季)	5430.32	2091.39	2656.95	385.21

表4 冬季上位パターンと夏季順位の関係

モデル名	冬季順位	評価値	夏季順位	評価値
C-2555	1	2091	3678	2762
C-4158	2	2095	689	2229
C-2554	3	2105	380	2165
C-2559	4	2112	2821	2552
C-2558	5	2118	1176	2304

表5 冬季下位パターンと夏季順位の関係

モデル名	冬季順位	評価値	夏季順位	評価値
C-1817	4368	5430	3913	2882
C-827	4367	5285	4186	3147
C-824	4366	5276	4202	3170
C-1322	4365	4873	4112	3040
C-1157	4364	4850	4108	3037

表6 夏季上位パターンと冬季順位の関係

モデル名	夏季順位	95%点	冬季順位	95%点
C-3873	1	2016	488	2277
C-2281	2	2020	69	2174
C-2182	3	2026	493	2278
C-3836	4	2029	742	2328
C-3837	5	2032	228	2217

表7 夏季下位パターンと冬季順位の関係

モデル名	夏季順位	95%点	冬季順位	95%点
C-1248	4368	4174	3591	2987
C-3885	4367	4101	3077	2784
C-793	4366	4087	3588	2987
C-470	4365	4029	4262	3627
C-2335	4364	3890	3822	3104

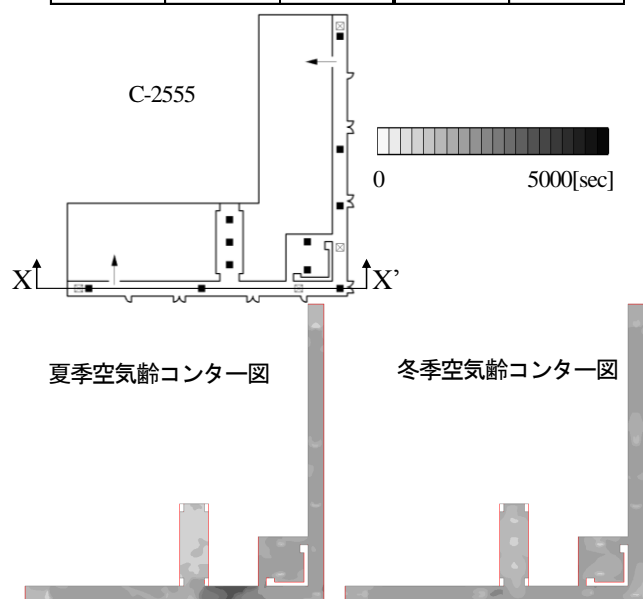


図5 C-2555の空調配置図と断面位置及び夏季と冬季の空気齢コンター図

4. 最適化を用いた設計支援ツール

空調の基本設計から人間の経験則や先入観を排除し定量的評価に基づく制気口配置設計を行うための方法の1つとして、全ての吹出口配置について解析し、その結果から最も良い物を設計案として検討する方法が考えられる。しかし、現実的に配置の全組合せを解析するには膨大な時間が必要であり不可能である。そこで、全解探索を行わなくてもある程度優秀な解を得ることが出来る確率的メタヒューリスティクスな最適化アルゴリズムを用いた設計支援ツールの提案を行う。この支援ツールの目的は優良吹出口配置の発見と計算量削減の2つである。

本研究では、最適化アルゴリズムとして遺伝的アルゴリズム(以下、GA)を用いる。GAとは、環境に適応した生物が生き残っていく自然淘汰の過程を模倣した計算により、問題に対する最適解を見付ける最適化手法である。図8にその流れを示す。

4.1 設計支援ツールの流れ

GAを用いた換気設計の流れを図7に示す。まず、基本となる廊下の形状を決定する。次に、梁や柱、照明など物理的な制約から空調制吹出口が配置できない場所を調べ、空調吹出口が配置可能な範囲を設定する。この2つの条件から、廊下と配置可能範囲に関するデータを作成し、計算機上で扱える形にする。最後に最適化とその評価プロセスでCFDを連携させ、終了条件を満たすまで解探索を行い最適な空調制気口の配置パターンを得る。

4.2 結果及び考察

本研究では、第一段階において得た評価値の良かった上位1%の個体を換気効率が十分良い個体であると判断し表5に優良個体を発見するまでに要する計算量を示す。本研究における計算量とは全パターンを100%とした場合、優良個体を発見するまでに出現したパターン数[%]である。表5を見ると夏季と冬季共に同じ最適なパラメータ設定を行った場合に計算量が約3% (約97%)で優良個体が発見できることがわかる。ひとつの解析及びデータ編集に7~8分の時間を要するため、夏季と冬季の両方を考慮した場合一ヶ月半程度かかる解析時間が一日半程度で設計者の経験や感覚に依存しない定量的判断に基づく吹出口配置を得ることができることになる。

以上のGAが換気設計に有用であることが分かった。

5. まとめ

本研究では熱条件により最適な吹出口配置が異なることを確認した。また、GAを用いた設計支援ツールを使用することで計算量を約97%程度の削減が可能であることを明らかにした。

6. 今後の課題

今後の課題として、吹出口の形状など本研究で検討しなかった設計パラメータについても検討する必要がある。

また、実際に全解探索が不可能な場合にどのように設計支援ツールを使用するかの検討が必要である。

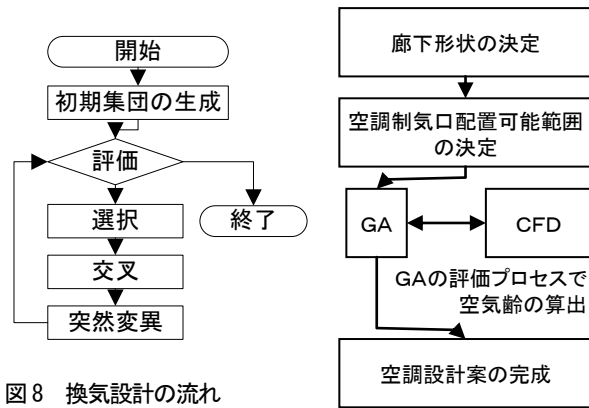


図8 換気設計の流れ

図7 GAの流れ

表8 GAの設定条件

遺伝子長	16
集団サイズ	20, 30, 40
交叉方法	部分写像交叉
交叉確率	80%
突然変異方法	2点交換
突然変異確率	1%, 5%, 10%
選択方法	ルーレット選択
エリート保存率	0%, 5%, 10%

表9 計算量

集団サイズ	突然変異確率	エリート保存率	夏季計算量	冬季計算量
20	1%	0%	6.94%	6.73%
20	5%	0%	6.55%	6.20%
20	10%	0%	6.25%	6.46%
20	1%	5%	4.83%	4.26%
20	5%	5%	4.69%	4.69%
20	10%	5%	4.58%	5.11%
20	1%	10%	3.48%	3.34%
20	5%	10%	3.78%	3.69%
20	10%	10%	4.28%	3.82%
30	1%	0%	6.75%	6.71%
30	5%	0%	7.01%	6.34%
30	10%	0%	7.60%	6.43%
30	1%	5%	5.65%	5.06%
30	5%	5%	5.59%	5.49%
30	10%	5%	5.91%	5.40%
30	1%	10%	4.14%	4.19%
30	5%	10%	4.53%	4.49%
30	10%	10%	4.99%	4.44%
40	1%	0%	6.94%	6.55%
40	5%	0%	6.82%	7.07%
40	10%	0%	6.64%	7.03%
40	1%	5%	5.22%	4.85%
40	5%	5%	5.49%	5.29%
40	10%	5%	5.79%	5.31%
40	1%	10%	4.69%	4.30%
40	5%	10%	4.62%	4.72%
40	10%	10%	5.06%	4.65%

【参考文献】

- 1) 高木顕二：非一方向流型クリーンルームにおける換気特性の分類に関する研究、平成14年度芝浦工業大学修士論文、2002
- 2) 矢野隆徳：遺伝的アルゴリズムを用いたクリーンルームの最適設計に関する研究、平成15年度芝浦工業大学学士論文、2003
- 3) 野尻賢一：遺伝的アルゴリズムを用いたCR吹出口の設計に関する研究-GAパラメータの特性-、平成16年度芝浦工業大学学士論文、2004
- 4) 熱影響を考慮した空調制気口の最適設計に関する研究、平成20年度芝浦工業大学学士論文、2008
- 5) 村上周三：新たな換気効率指標と三次元乱流数値シミュレーションによる算出法、空調調和衛生学会論文集、No.32, pp91-101、1986