

テキスタイルダクトと放射天井による対流・放射併用型空調に関する研究  
(その3) CFD解析によるテキスタイルダクト単体使用時の室内空気質・温熱環境評価

Air-Conditioning System Coupling Convection with Radiation

Using Textile Duct and Chilled Ceiling

(Part3) Evaluations for Indoor Air Quality and Thermal Comfort of

Air-Conditioning System Using Textile Duct by CFD Simulation

○鈴木 克治 (大阪大学) 桃井 良尚 (福井大学)

山中 俊夫 (大阪大学) 甲谷 寿史 (大阪大学)

Katsuharu SUZUKI\*<sup>1</sup> Yoshihisa MOMOI\*<sup>2</sup> Toshio YAMANAKA\*<sup>1</sup> Hisashi KOTANI\*<sup>1</sup>

\*<sup>1</sup> Osaka University \*<sup>2</sup> Fukui University

Textile duct ventilation is a remarkable air-conditioning system because it can supply large air volume with a very low speed of air velocity. As compared with the conventional air-conditioning system, the ventilation rate can be reduced without compromising occupants' thermal comfort in the textile duct ventilation system, which can supply fresh air only around occupied zone. In this paper, the indoor air quality and thermal comfort were surveyed in the case of only using textile duct as air-conditioning system by CFD simulation. Finally the design chart of IAQ classified by Ar was suggested.

1. はじめに

大風量・低風速吹き出しにより、居住者にドラフト感を与えない空調システムとして、近年テキスタイルダクト (以下、TD) が注目されている<sup>1)</sup>。これは通気性のある不燃性の布でできた円筒形や半円筒形のダクトであり、Fig. 1に示すように温度差によって居住域周辺に新鮮空気を提供するため、従来型混合換気と比較して、居住域の室内空気質・温熱環境改善に役立つと考えられる。Fig. 2に、床面を天井面とみなしてTDより暖房気流を吹き出した冷房想定気流の可視化写真 (冬季に撮影) を示す。他にもTDには次のような利点がある。

- ・従来の混合換気方式に比べて低風速で吹き出すため、居住者にドラフトを感じさせず、汚染質を混合しない。
- ・レイアウトの面でフレキシビリティに優れ、取り付けが簡単で、洗濯もでき、衛生的である。

桃井ら<sup>3)</sup>はTDと水冷式の放射天井を併用した空調システムを有するオフィスを模擬した実験を行い、サーマルマネキンを用いて温熱環境評価を行っている。本研究では、TDを用いた室の空気質・温熱環境評価を行い、最適な空調システムの組み合わせ及び設計手法の確立を目指す。本報では、TDのみを空調システムとして用いた標準的なオフィスを想定した室の空気質・温熱環境をCFD解析し、空気質指標をAr数で整理した結果を示す。

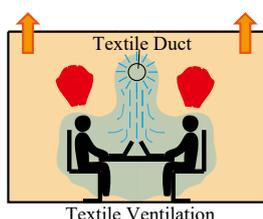


Fig. 1 Air Distribution Strategy



Fig. 2 Visualization of TD Plume

2. 標準オフィスモデル

解析空間として、Fig. 3に標準的な3.6×3.6mモジュールで構成され2つの執務空間をもつセンターコア方式のようなオフィスを示す。実際の解析空間はインテリアゾーン内に存在するものとし、Fig. 3に示す1モジュールの一部分のみを解析した。解析空間は上下左右対称となるようにし、側壁に対象境界面を採用して解析を簡略化した。TD方式と比較する混合換気 (MV) 方式の吹き出し口のモデル化手法をFig. 3中の左に示す。Fig. 4に平面レイアウト及び天井レイアウトを、Fig. 5にパースを、Fig. 6に立面図を示す。各モジュールには6人が作業を行えるワークスペース (人体6人、机6つ、ノートPC6つ、OA機器2つ) が設けられている。また、Fig. 6のように本解析では主に「吹出し方式に関する検討」と「TD設置位置に関する検討」を行い、それぞれTD方式はMV方式よりも優れているか、またTDの設置位置はどこ (机の上、人体の上、廊下の上) が良いか、という観点から解析結果を整理した。また前者では、MV方式モデルの階高を3.0mまたは2.6mの2通り設定した。これは、TD方式は天井裏のダクティングが不要なため、天井高を

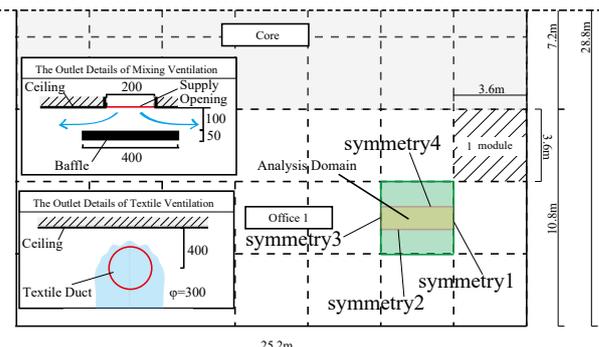


Fig. 3 Plan of Standard Office

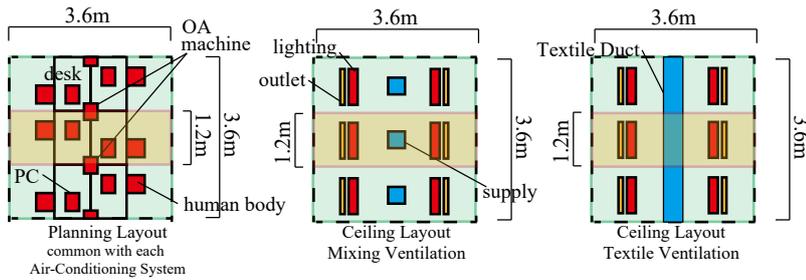


Fig. 4 Planning with each Model (Mixing / Textile)

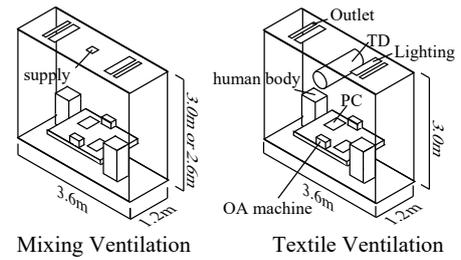


Fig. 5 Perth with each Model (Mixing / Textile)

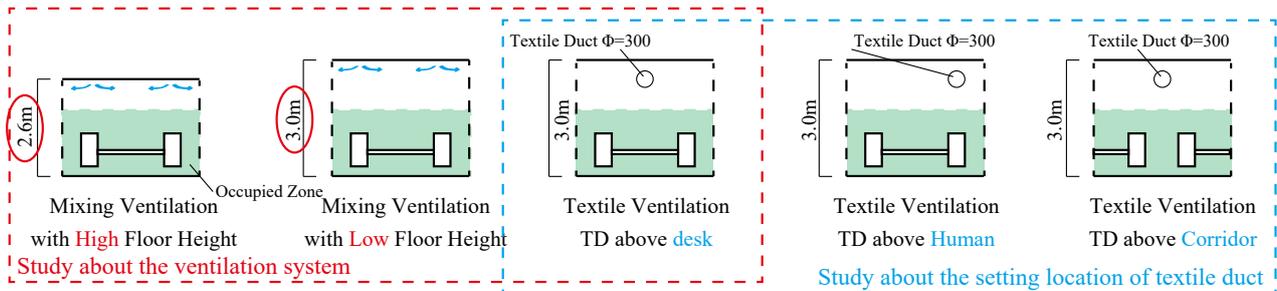


Fig. 6 Elevation of Analysis Domin (ventilation system / setting location of TD)

MV方式に比べて高であるためである。一方、階高を変えたことによる影響も考慮するため、MV方式ではTD方式と同じ階高の条件も設定した。Table 1に発熱条件を示す。発熱条件には、「全員着席時」と「半分着席時」の二通りを想定し、各値は文献<sup>4)</sup>により決めた。Table 2に解析条件を示す。流れ場・温度場・濃度場(CO<sub>2</sub>、トレーサーガス)を解析し、誤差の収束、収束解を得られたか、熱量収支バランス等の観点から解析精度を担保した。また、Table 3に各解析ケースの境界条件を示す。各境界条件は完全混合時に熱負荷を取り除ける換気量、温度差を設定した。MV方式では温度差は2,4,6°C差、TD換気方式では温度差は8,12,16°C差としたが、これは予備解析で8°C以上の温度差にしないとTDからの気流が下降しなかったためである。

### 3. 乱流モデルとメッシュ分割による予備解析

TDを空調システムとして用いる場合、Chenらによって標準k-εモデルの有用性が示されている<sup>5)</sup>。また、吹出し気流が10<sup>2</sup>[m/s]オーダーと非常に低風速になるため、乱流モデルとして低Re型k-εモデル(Abe-Kondoh-Naganoモデル; AKN)についても検討を行った。また、乱流モデルの違いとメッシュの細かさをパラメータとして予備解析を行った(Table 4)。

メッシュ数は、標準分割(standard)では壁面回り・人体回りは20mm、周辺は40mmで分割し計836,700メッシュ、詳細分割(fine)では壁面回りは10mm、人体回りは20mm、周辺は40mmで分割し計5,735,400メッシュとした。Fig. 7に各ケースの壁面近傍第一メッシュの平均(および最大、最小)y<sup>+</sup>[-]を示す。細かく分割したcaseC,Dで壁面近傍第一メッシュが粘性底層付近まで達している。SKEでは壁関数としてEWTを採用しているため、y<sup>+</sup>[-]値の影響はないと思われる<sup>6)</sup>。

Table 1 Heat Value Condition

Name	Heat Value[W]	Number [-]		Note
		All member	Half member	
Human body	60	2	1	with CO <sub>2</sub> supply surface
Laptop	30	2	1	-
Lighting	32	2	2	60% on Lighting position, 40% on desk and floor
OA Machine	150	1	1	calculated as 1,500W each module and 30% of load ratio
Total Heat Gain [W]		394	304	

Table 2 Analysis Condition

CFD Code	ANSYS FLUENT 16.1		
Turbulent Model	Standard k-ε Model Low Re k-ε Model (Abe-Kondoh-Nagano;AKN)		
Algorithm	SIMPLE		
Discretization Scheme	Body Forced Weighted(pressure term) / QUICK (others)		
Mesh	Mixing Ventilation	836,700	
	Textile Ventilation	5,735,400	
Inlet	The Boundary Condition is referred Table 3.		
Outlet	Natural Flow out (Flow Reserved)		
Wall	Floor and Ceiling	no slip, Insulation, Enhanced Wall Treatment	
	Side	symmetry	
Contaminant	tracer-gas	generated as space uniform(Passive Contaminant)	
	CO <sub>2</sub>	0.02[m <sup>3</sup> /h], 100% of CO <sub>2</sub> is generated by human body.	
Density	Boussinesq Approximation		

Table 3 Boundary Condition

Mixing Ventilation					
case No.	Velocity [m/s]	Temperature[°C]	Target Temp.[°C]	Room Height[m]	Heat Value[W]
1	4.11	24	26	3.0 or 2.6	394
2	2.04	22			
3	1.35	20			
4	3.17	24			
5	1.58	22			304
6	1.04	20			
Textile Ventilation					
case No.	Velocity [m/s]	Temperature[°C]	Target Temp.[°C]	Duct Diameter[m]	Heat Value[W]
1	0.036	18	26	0.3	394
2	0.028	16			
3	0.023	14			
4	0.028	18			
5	0.022	16			304
6	0.018	14			

Table 4 Preliminary Analysis cases

		Mesh	
		standard	fine
Turbulent Model	SKE	case A	case C
	AKN	case B	case D

Fig. 8 に予備解析の結果を風速ベクトル図で示す。TD からの明確な下降気流が見られるのは caseD のみであり、他のケースでは下降気流となっていない。よって、以後 TD 方式の場合は caseD を用いる。一方、MV 方式の場合は caseA で十分な精度が得られた。

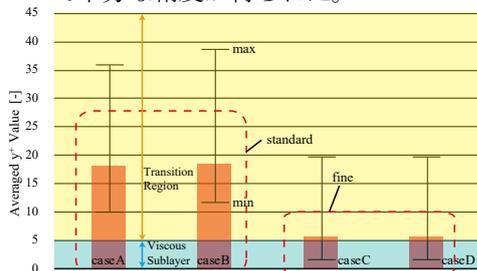


Fig. 7 Averaged  $y^+$  Comparison (Preliminary Analysis)

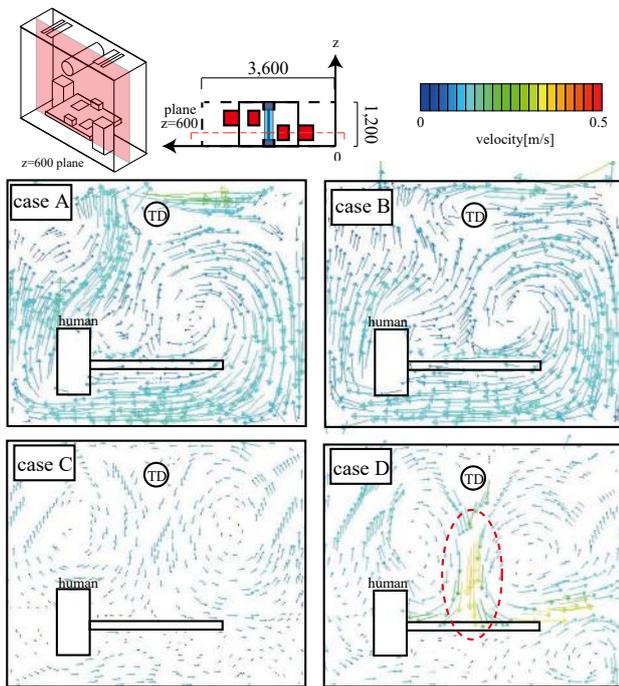


Fig. 8 Velocity Vector on plane  $z=600\text{mm}$  (Preliminary Analysis)

#### 4. 吹出し方式に関する検討

Fig. 9 に TD を机の直上に設置した条件 (case1) の結果 (風速コンター、鉛直分布) を示す。TD には  $0.036\text{m/s}$  の初期風速のみ与えたが、TD 直下 ( $(x,z)=(1,800,600)$ ) では一部風速が最高  $0.4\text{m/s}$  にまで達している。これは、Fig. 8 のベクトル図 (caseD) より、周辺空気の巻き込みにより風速が増加したものと考えられる。

次に、各ケースの上下温度差分布を Fig. 10 に示す (ただし TD 換気方式の case5, 6 は収束が不十分である可能性がある)。一般的な居室において、居室上部で高温で、床近傍が低温である室内では、熱的不快感を生じ、ASHRAE Standard 55-2013<sup>7)</sup> によると頭部温度と脚部温度差が  $3^\circ\text{C}$  以内となることが居住者の温熱環境上望ましいとされている。一般的に頭部が脚部より冷える逆転現象 (頭寒足熱) が起こることはま

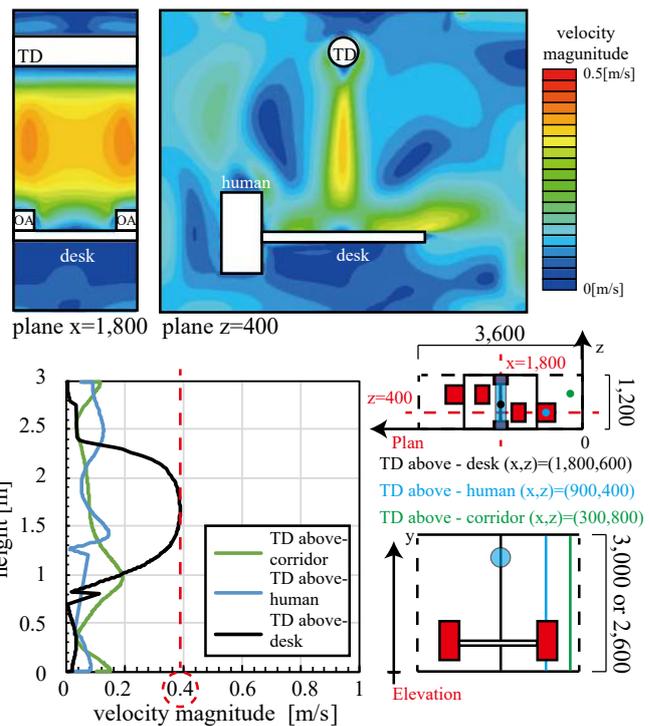


Fig. 9 Velocity Contour and vertical distribution (case1)

れだが、これはより望ましいこととされている。結果より、上下温度差はいずれの換気方式でも推奨値以下であるが、TD 方式において「頭寒足熱」が観測され、より望ましい温熱環境を形成したといえる。TD による下降気流が頭部を局部的に冷却するためである。

Fig. 11 に各ケースの規準化居住域濃度  $C_n$  を (居住域平均濃度  $C_a$  と排気濃度  $C_e$  の比 ( $C_n=C_a/C_e$ )) を示す。居 TD 方式において、MV 方式の場合よりもわずかに優れた値を示した。MV 方式では階高によらず特に高風速の case1 で滞留が見られた。よって空気質・温熱環境双方の面から TD 方式は MV 方式よりも優れているといえる。

#### 5. TD 設置位置に関する検討

Fig. 12 に 3 か所の TD 設置位置 (Fig. 6 右側に示す 3 か所で、机上、人体上、廊下上) について検討した上下温度差分布を示す。机上で最も良い値を示すのは、TD 下降気流が机に衝突し、冷気が居住域に効率的に供給されるためと思われる。一方人体上に設置した場合、TD 下降気流が人体からの上昇プルームと衝突し、居住域に冷気が到達しないため、上下温度差ができると考えられる。

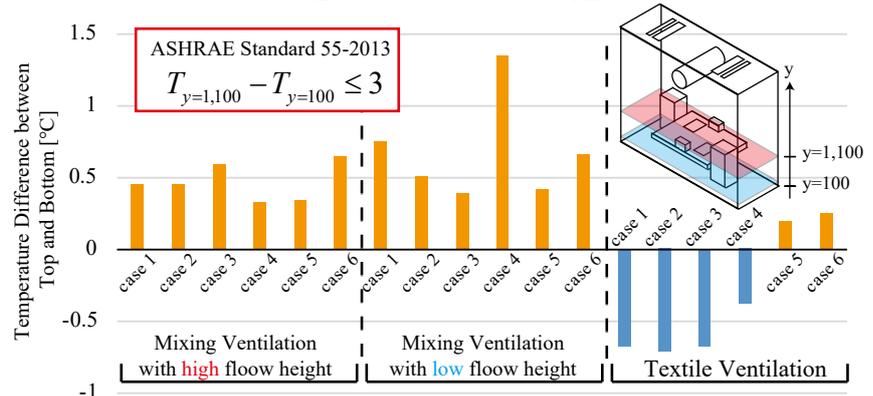


Fig. 10 Temperature Difference between Top and Bottom (ventilation system)

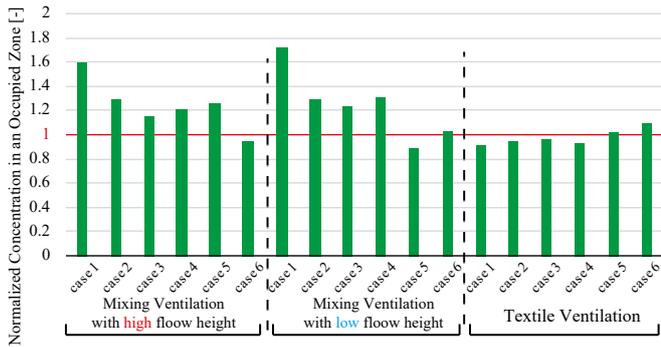


Fig. 11 Normalized Concentration in an Occupied Zone (ventilation system)

#### 6. Ar 数 - 空気質指標関連

アルキメデス数  $Ar$  は室の気流分布を支配する吹き出し気流風速と温度差を考慮した無次元数であり、 $Ar$  数により空気質指標を整理する。 $Ar$  数を下式で表す。

$$Ar = \frac{g\beta L(T_{out} - T_{in})}{u^2}$$

$g$ ; 重力加速度 [ $m/s^2$ ],  $\beta$ ; 体膨張率 [ $1/K$ ],  $L$ ; 代表長さ [ $m$ ],

$u$ ; 吹き出し風速 [ $m/s$ ],  $T_{in}$ ; 吹き出し温度 [ $K$ ],  $T_{out}$ ; 周辺温度 [ $K$ ]

MV 方式の場合代表長さには吹き出し口の短辺スロット幅を用いるのが一般的であるが、本解析では  $Ar$  数が小さくなりすぎることと、階高の影響を考慮し、階高を用いた。Fig. 13 に、 $Ar$  数を横軸に、汚染質除去効率 ( $CRE$ )、規準化居住域濃度 ( $C_n$ )、居住域平均空気齢、空気交換効率を縦軸にプロットした図を示す。

- ①  $Ar$ - $CRE$  相関 ... 混合換気方式の場合は正の相関、TD 方式の場合設置位置によらず横這いである。
- ②  $Ar$ - $C_n$  相関 ... 混合換気方式の場合、階高の差によらずやや負の相関が見られる。TD 方式の場合、設置位置によらず横這い～やや正の相関がみられる。
- ③  $Ar$ -居住域平均空気齢 ... 対数関数的正の相関をもつ。
- ④  $Ar$ -空気交換効率相関 ... 混合換気方式の場合、階高によらず正の相関が見られ、TD 方式の場合、設置位置によって関係が異なり、TD 位置によって室の空気質が異なる。

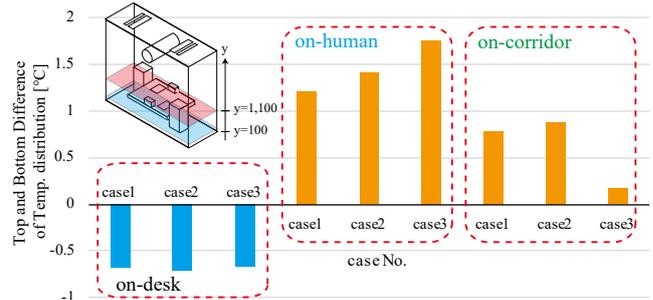


Fig. 12 Temp. Difference Top and Bottom (location of TD)

#### 4. おわりに

本報では TD 方式を採用したオフィスの CFD 解析を行い、各空気質指標を  $Ar$  で整理した。また、予備解析により TD を CFD 解析に用いる際に最も適切な乱流モデルの選択、メッシュ分割を明らかにした。また、流れ場 ( $Re$  数) と各空気質指標との相関は、 $Re$ - $C_n$  相関を除いて基本的に負の相関関係であった。風速コンター図を確認すると、TD 方式において吹き出し気流が居住域に到達し、居住域が良く換気されている様子がうかがえた。

#### 【参考文献】

- 1) 中川浩明：不燃性と通気性を有するソックダクトの性能評価及び業務用厨房における実測評価，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp.41-44,2015.9
- 2) P.V.Neilsen:Air Distribution in Rooms Generated by a Textile Terminal-Comparison with Mixing and Displacement Ventilation, ASHRAE Transaction, Part8, pp.733-739, 2005.6
- 3) Y.Momoi,G.Ntosti,S.Moiragias,Z.Bolashikov,A.Melikov. Thermal Environment of Textile Based Ventilation Combined with Chilled Ceiling.Proceedings of Clima 2016 congress, Aalborg, Denmark. 2016.
- 4) 空気調和・衛生工学会：空気調和・衛生工学便覧基礎編，p338, 2010. 2
- 5) Fujiang Chen, Huanxin Chenb, Hong Wanga, Shuli Wanga, Jinliang Wanga, Xiaobing Wanga, Zhong Qiana; Parametrical analysis on characteristics of airflow generated by abric air dispersion system in penetration mode; Energy and Buildings 67;pp.365-373; 2013
- 6) 空気調和・衛生工学会：CFD ガイドブック，pp. 16-20, 2017. 11
- 7) ASHRAE, 2013, ANSI/ASHRAE Standard 55-2013, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, Atlanta:ASHRAE

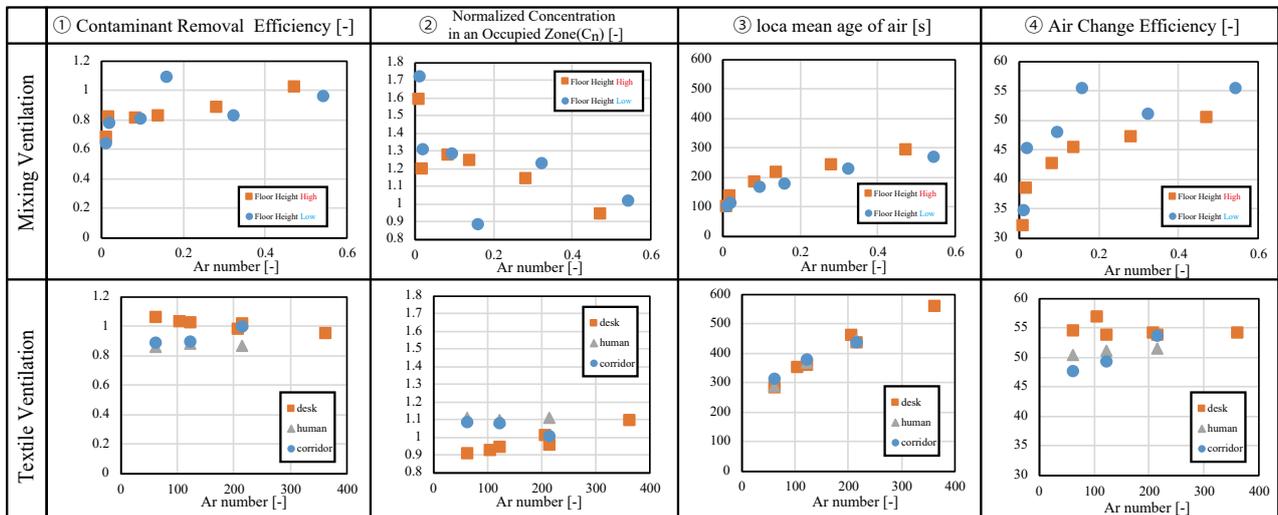


Fig. 13 the Correlation between Ar number and Index of Indoor Air Quality (All cases)