

置換換気のための空気清浄機能を有するポータブル冷房ユニットの開発研究

(第2報) 実験による温度成層形成及び飛沫核除去効率の検討

A Study on a Novel Portable Cooling Unit With Air Purification for Displacement Ventilation
(Part 2) Experimental Investigation of Temperature Gradient and Droplet Nuclei Removal Effectiveness

○小森 美晴 (大阪大学) 山中 俊夫 (大阪大学) 崔 ナレ (大阪大学)
 小林 知広 (大阪大学) 小林 典彰 (大阪大学) ESSA Aya (大阪大学)
 松井 伸樹 (ダイキン工業(株)) 岡本 哲也 (ダイキン工業(株)) 荒川 武士 (ダイキン工業(株))
 矢本 勇樹 (ダイキン工業(株)) 大高 将悟 (ダイキン工業(株))

Miharu KOMORI^{*1} Toshio YAMANAKA^{*1} Narae CHOI^{*1} Tomohiro KOBAYASHI^{*1}

Noriaki KOBAYASHI^{*1} Aya ESSA^{*1} Nobuki MATSUI^{*2} Tetsuya OKAMOTO^{*2}

Takeshi ARAKAWA^{*2} Yuki YAMOTO^{*2} Shogo OTAKA^{*2}

^{*1}Osaka University ^{*2}Daikin Industries, Ltd.

This study focuses on the displacement ventilation (DV) method, which is capable of both energy conservation and ventilation efficiency, and is a ventilation method that can form a thermal stratification in a room and efficiently exhaust pollutants. In this study, we propose a portable displacement ventilation unit (PDVU), which is a mobile diffuser that not only enhances thermal stratification but also purifies the air. In the previous paper, block model calculations and CFD analysis were conducted. In this paper, experiments in a small chamber are conducted to verify the performance of this unit.

はじめに

近年の新型コロナウイルスの流行に伴い、高効率な換気手法に注目が集まっており、本研究では省エネと換気効率を両立出来る置換換気 (DV) 方式に着目する。DV は室内に温度成層を形成し、効率的に汚染物を排気出来る換気方式であるが、室形状や室内発熱源の配置などにより、均一な給気が行えず室内の温度成層形成に悪影響を与える可能性がある。そこで本研究では温度成層形成の強化に加え空気清浄も可能な可動式ディフューザーである、ポータブル置換換気ユニット (Portable DV unit、以下 PDVU) を提案する。Fig. 1 に PDVU の概要図を示す。前報¹⁾において、簡易なゾーンモデル計算及び CFD 解析による検討を行ったが、本報では実験を行い、性能検証を行う。

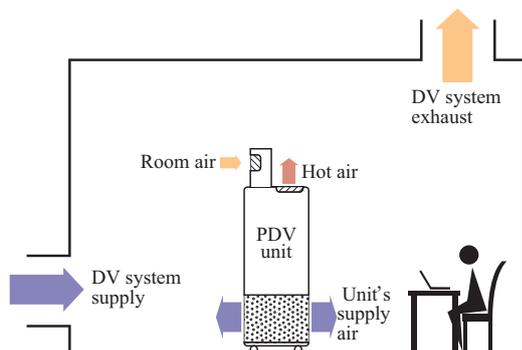


Fig. 1 PDVU

1. 実験概要

1.1 実験室と実験機器

実験室の平面図を Fig. 2 に示す。室内には、座位人体を模擬した ϕ 400mm、高さ 1000 mm の発熱体²⁾(発熱量 100 W / 体)を 2 体、換気用 DV ディフューザー、PDVU の機能試作機を図のように設置した。換気用 DV ディフューザーは吹出風速が低くなるよう高さ 600 mm、 ϕ 300 mm のソックダクトを使用した。PDVU の機能試作機はフレーム内に上から順に、吸込みユニット、温風吹出ユニット、冷風吹出ユニットが組み込まれている。吸込みユニットは側面の内 3 面に吸込み用のフィルターを貼り、側面の残り 1 面と上面にダクトがそれぞれ 1 本ずつ接続されている。温風吹出ユニット、冷風吹出ユニットは換気用 DV ディフューザーと同様、吹出風速が小さくなるようソックダクトを使用した。各ユニットの寸法は、吸込みユニットが 300 mm 角の立方体、温風吹出ユニットは高さ 300 mm、 ϕ 300 mm、冷風吹出ユニットは高さ 600 mm、 ϕ 300 mm である。DV ディフューザーはチャンバー外の空気を吸込み、HEPA フィルターを通した後、循環型温度制御装置 (AP-750M-C、オリオン機械 (株)) で温度調節、アイリスダンパー (ϕ 150 mm) で流量調節し室内に給気する。PDVU は、吸込みユニットに繋がっている 2

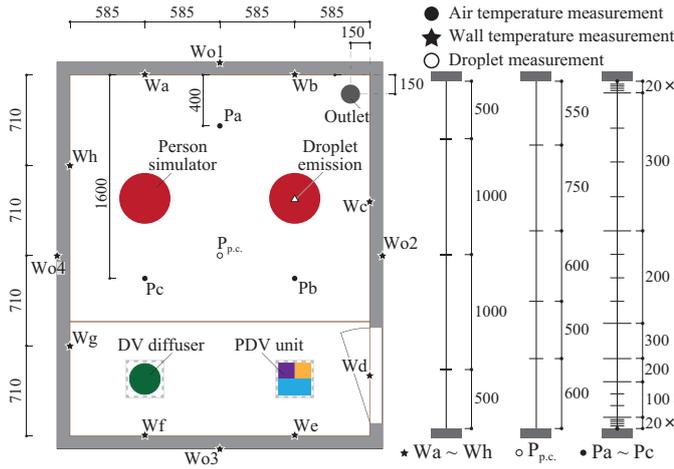


Fig. 2 Plan view

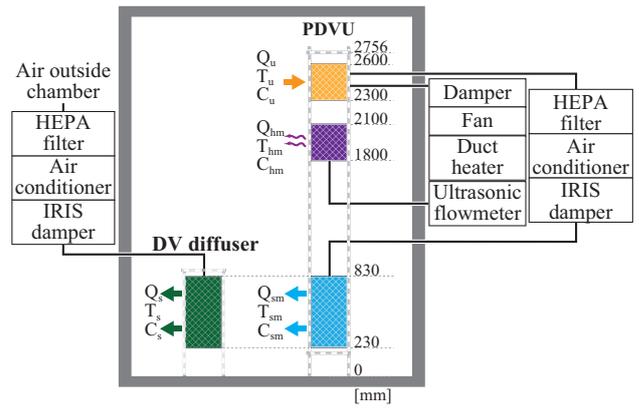


Fig. 3 Equipment layout

Table 1 Experimental condition

Case name	DV200	DV200 - PDVU200	DV300 - PDVU300
Supply air flow rate from DV diffuser Q_s [m ³ /h]	200	200	300
Supply air temperature from DV diffuser T_s [°C]	6.0	6.0	6.0
Supply air flow rate from PDV unit Q_{sm} [m ³ /h]	-	200	300
Supply air temperature from PDV unit T_{sm} [°C]	-	6.0	6.0
Hot - air temperature from PDV unit Q_{hm} [m ³ /h]	-	200	200
Supposed COP of PDV unit	-	3.5	
Supposed input power of PDV unit I [W]	-	100	
Heat emission rate of duct heater [W]	-	450	



Fig. 4 PDVU



Fig. 5 DV diffuser

本のダクトの内、1本からファン(FY-23DZ4、パナソニック(株))を用いて室内空気を引っ張りダクトヒーター(DM-11N、日本ヒーター(株))で加熱した後、超音波流量計(TRZ150D-C、愛知時計電機(株))と接続し、温風吹出ユニットから給気する。なお超音波流量計はデータロガー(RTR-505、T&D(株))で電流を測定間隔1分で測定し、流量換算を行うことで流量を測定する。吸込みユニットに接続された残り1本のダクトから引っ張った空気は、飛沫核除去用のHEPAフィルターを通した後、循環型温度制御装置(AP-750M-D、オリオン機械(株))に接続して冷却を行い、アイリスダンパー(φ125mm)と微差圧計(DP-45、バリデザイン社)

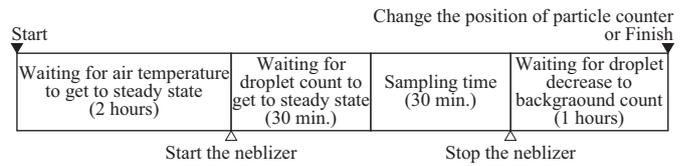


Fig. 6 Measurement procedure

で流量を調節し室内に給気する。排気口は Fig. 2 に示す位置の天井面に設置し、自然排気を行った。温度成層の形成及び飛沫核除去性能について検討を行うため、温度分布及び飛沫核濃度分布を測定した。温度分布は、Fig. 2 に示す Pa ~ Pc で、T型熱電対(データロガー: cadac3、江藤電気(株))を用いて各点鉛直方向22点の空気温度と天井面・床面温度を測定間隔1分で測定した。壁面温度は、同じT型熱電対を用いて Wa ~ Wh において、各点鉛直方向3点で測定した。また、参考値として、全壁面の室外側表面温度を各壁面の中央1点で測定間隔1分で測定した。飛沫核除去性能の評価のため、Fig. 2 に示す右側の発熱体の上部にネブライザー(オムロン(株))を設置し飛沫を発生させ測定を行った。飛沫核の沈下防止のため、空気より密度の小さいN₂ガスを2NL/min注入して飛沫を発生させた。ネブライザーには穴を開けたペットボトルを被せることで発生速度を小さくし、さらにペットボトルにヒーター(発熱量12.3W)を巻き付けることで温めてから飛沫を発生させた。飛沫には既往研究³⁾⁴⁾を参考に、水1Lに対して塩化ナトリウム12gとグリセリン76gを加えて粘性を調整した模擬唾液を使用した。飛沫核の濃度分

布はパーティクルカウンター (KC-52、リオン (株)) を用いて、Fig. 2 に示す $P_{p.c.}$ にて鉛直方向 4 点で測定間隔 1 分で測定を行った。なお、床から 2450 mm の高さは PDVU の吸込みユニットの中央高さとなっている。また換気用 DV ディフューザー、排気口、PDVU の吸込みユニット、温風吹出ユニット、冷風吹出ユニットの温度は T 型熱電対、飛沫核濃度はパーティクルカウンターで測定した。パーティクルカウンターの可測粒形範囲は $0.3 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 、 $0.5 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 、 $1.0 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 、 $2.0 \sim 5.0 \mu\text{m}$ 、 $> 5.0 \mu\text{m}$ 、定格流量は 2.83 L/min である。

1.2 実験条件

実験条件を Table 1 に示す。PDVU の有無による検討のため、DV のみ $200 \text{ m}^3/\text{h}$ で行う DV200 条件、DV $200 \text{ m}^3/\text{h}$ に加えて PDVU の冷風・温風給気を $200 \text{ m}^3/\text{h}$ ずつ行う DV200 - PDVU200 条件、さらに給気量の違いによる検討のため、DV $300 \text{ m}^3/\text{h}$ 行った上で PDVU の冷風給気を $300 \text{ m}^3/\text{h}$ (温風給気: $200 \text{ m}^3/\text{h}$) 行う DV300 - PDVU300 条件の計 3 条件を行った。PDVU 使用条件の PDVU は両条件とも COP を 3.5、入力電力量 I を 100 W と想定しダクトヒーター加熱量を決定した。

2. 結果と考察

2.1 温度

各条件の鉛直温度分布の結果を Fig. 7 に示す。結果より、DV200 条件ではなだらかな温度成層を形成して

いるのに対し、PDVU を使用した 2 条件では室上部ではより高く、室下部ではより低い分布となり、PDVU による温度成層の強化が示唆された。また室下部では、DV のみ行った条件よりも PDVU を使用した 2 条件の方が $1 \sim 2 \text{ }^\circ\text{C}$ 程度低くなり、対して、室上部では、DV200 - PDVU200 条件は DV200 条件よりも温度が高くなり、PDVU による冷却・加熱能力の効果が見られた。しかし室上部での DV 条件と PDVU 使用条件間の温度差は非常に小さく、特に DV300 - PDVU300 条件においては、 P_b のみで DV200 条件よりも室上部温度が高くなり、 $P_a \cdot P_c$ では DV200 条件よりも室上部温度が低い結果となった。そこで、PDVU の熱収支について確認を行うため計算を行った。結果を Table 2 に示す。なお、計算には全て測定値を用いた。PDVU の加熱量の結果を見ると、DV300 - PDVU300 条件では 444.59 W 加熱出来ているが、DV200 - PDVU200 条件では 329.15 W しか加熱出来ていないことが確認出来た。PDVU を使用した 2 条件とも熱損失が大きかったことから、原因として、壁からの貫流熱やダクトからの熱損失が考えられる。Fig. 8 に壁面温度と近くの空気温度を比較したグラフを示す。グラフからも分かるように室内外の壁面温度に大きな差が見られ、壁面からの貫流熱は大きかったことが考えられる。

2.2 飛沫核

Fig. 9 に、DV200 - PDVU200 条件の、DV からの給

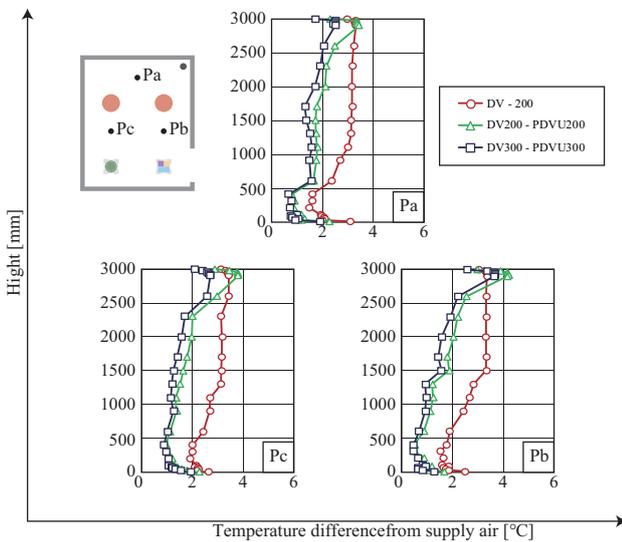


Fig. 7 Air temperature distribution

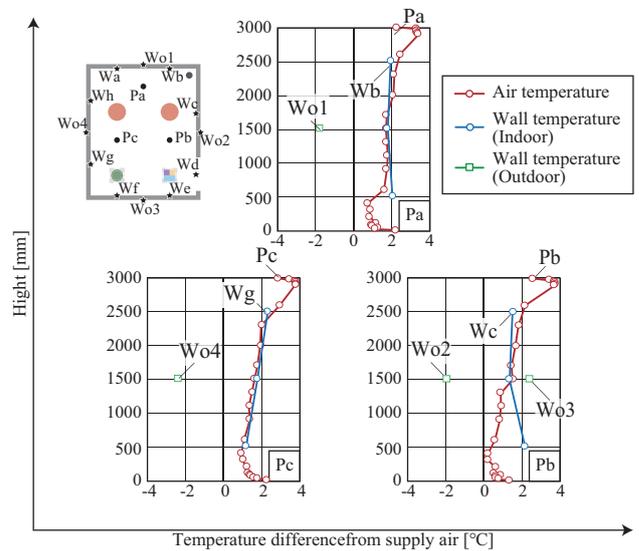


Fig. 8 Air and wall temperature (DV200 - PDVU200)

Table 2 Heat balance

	Cooling power of PDVU	Cooling power of DV	Heating power of PDVU	Heat emission rate of person simulator	Heat loss	Input power of PDVU I
	$Q_{sm} \times (T_u - T_{sm}) \times C_p \rho$ [W]	$Q_s \times (T_e - T_s) \times C_p \rho$ [W]	$Q_{hm} \times (T_{hm} - T_u) \times C_p \rho$ [W]	100×2 [°C]	[W]	(Heating power of DV) - (Cooling power of DV) [W]
DV200	-	183.56	-	200	16.44	-
DV200 - PDVU200	315.72	121.65	329.15		91.78	13.43
DV300 - PDVU300	289.81	159.25	444.59		195.54	154.78

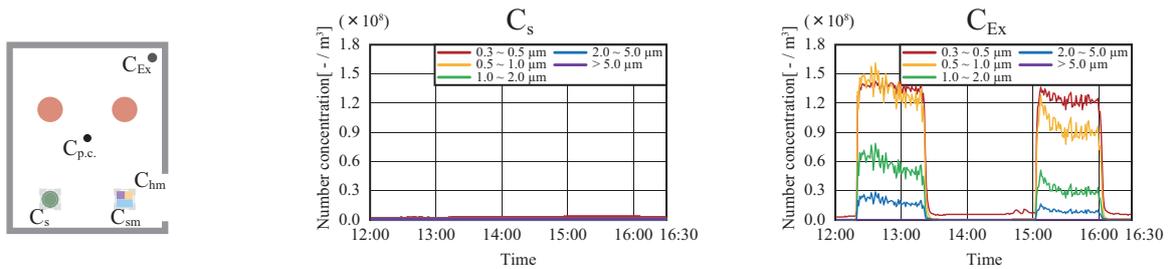


Fig. 9 Variation of droplet count (DV200 - PDVU200)

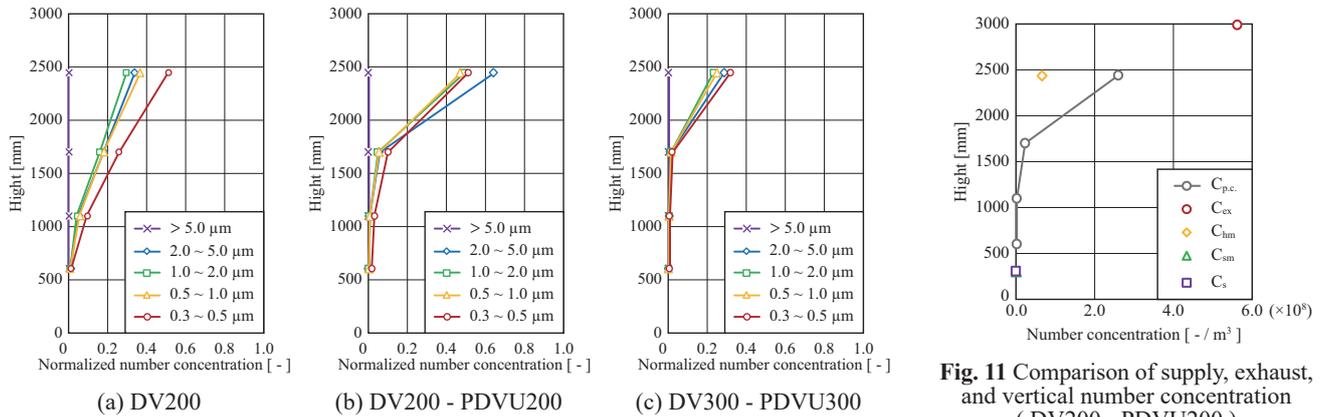


Fig. 10 Vertical number concentration of droplet nuclei

Fig. 11 Comparison of supply, exhaust, and vertical number concentration (DV200 - PDVU200)

気と排気の飛沫核個数濃度の経時変化を示す。グラフより給気の個数濃度が十分に小さいことを確認した。Fig. 10 に各条件の飛沫核測定結果を示す。評価には各測定点の個数濃度を排気の個数濃度で規準化した規準化個数濃度を用いる。結果からも DV300 - PDVU300 条件、DV200 - PDVU200 条件、DV200 条件の順に濃度が高い結果となり、PDVU による飛沫核除去効果が見られた。また、上下方向の分布を見ると、DV200 条件では床から 600 mm の高さまで、DV200 - PDVU200 条件では床から 1100 mm の高さまで規準化飛沫核個数濃度をほぼ 0 に抑えられているが、DV300 - PDVU300 条件では床から 1700 mm の高さまで規準化個数濃度をほぼ 0 に抑えられている。以上より、DV のみ行うより PDVU を設置する方が、さらに、PDVU の冷風給気量 Q_{sm} を大きくする方が居住域の飛沫核濃度を小さく抑えることができ、さらに濃度境界面を上昇させることができる可能性が考えられる。Fig. 11 に DV200 - PDVU200 条件の給排気の飛沫核個数濃度 ($> 0.3 \mu\text{m}$) を比較したグラフを示す。グラフより、PDVU の吸込みユニット中央高さである、 $P_{p.c.}$ の 2450 mm 高さの個数濃度と PDVU の冷風給気の個数濃度 P_{sm} を比較すると、 P_{sm} が非常に小さい個数濃度となっていることから、室上部で吸込んだ空気を HEPA フィルターにより概ね浄化出来ていることが確認出来る。

3. おわりに

本報では置換換気の温度成層強化及び空気清浄機能を有する PDVU の性能検証を行うため、小規模チャン

バーによる実験を行った結果について報告した。得られた知見を以下に示す。

- 鉛直温度分布：DV 条件ではなだらかな温度成層を形成していたのに対し、PDVU を使用した条件では室上部でより高く、室下部ではより低い温度分布となり、PDVU による温度成層強化が確認できた。
 - 飛沫核：DV のみ行うよりも PDVU を使用する、さらに PDVU からの冷風給気量を大きくすることで室内の飛沫核個数濃度を小さくでき、加えて、濃度境界面の高さも上昇させられることが明らかになった。
- 今後は、DV 及び PDVU の給気量や PDVU の能力をパラメータとして、引き続き実験を行い検討を行う予定である。

参考文献

- 1) A. Essa et al. : A Study on a Novel Portable Cooling Unit With Air Purification for Displacement Ventilation (Part 1) Parametric Study with Zonal Model and CFD Analysis For PM Concentration and Temperature Distribution, 2023. 3, The Society of Heating, Air - Conditioning and Sanitary Engineers of Japan
- 2) 除鳴、山中俊夫、甲谷寿史、東本文明：置換換気される室内において冷却・加熱壁面が温度及び汚染物濃度の鉛直分布に及ぼす影響、日本建築学会計画系論文集 No.544, pp.17-23、2001.6
- 3) Wan, M. P., C. Y. H. Chao, Ng, Y. D., Sze To, G. N., and Yu, W. C.: Dispersion of Expiratory Droplets in a General Hospital Ward with Ceiling Mixing Type Mechanical Ventilation System, Aerosol Science and Technology, 41:3, 244-258, 2007
- 4) 尾方壮行、市川真帆、堤仁美、有賀隆男、堀賢、田辺新一：模擬咳発生装置による飛沫沈着量分布の測定、日本建築学会環境系論文集第 83 巻、pp.57 - 64、2018.1