

PAC を用いた膜天井放射空調の冷暖房性能に関する研究

(その 14) 冷気分配性能及びドラフト感評価

Cooling and Heating Performance of Ceiling Radiant Membrane Air Conditioning System with PAC

(Part 14) Evaluation of Cold Air Distribution Performance and Draught Rate

学生会員 ○上村 芙美子 (大阪大学) 技術フェロー 山中 俊夫 (大阪大学)
 正会員 小林 知広 (大阪大学) 正会員 袁 継輝 (豊橋技術科学大学)
 正会員 崔 ナレ (大阪大学) 正会員 前田 龍紀 (竹中工務店)
 正会員 新宮 浩丈 (竹中工務店) 正会員 安江 楽人 (竹中工務店)

Fumiko KAMIMURA*¹ Toshio YAMANAKA*¹ Tomohiro KOBAYASHI*¹ Jihui YUAN*²

Narae CHOI*¹ Tatsunori MAEDA*³ Hirotake SHINGU*³ Rakuto YASUE*³

*¹Osaka University *²Toyohashi University of Technology *³Takenaka Corporation

The authors conducted the experiment to obtain the knowledge about the distribution characteristics of cooling air from Attic to Indoor space and the draught rate (DR) with using the membrane radiant cooling system with PAC. About air distribution characteristics, we calculated the local mean age of air in all measurement points and the air distribution characteristics to grasp how cooling air in attic flows into Indoor space and ventilation efficiency. The DR may be expressed as the percentage of people to be bothered by draught. Using the model of draught, we can calculate it.

1. はじめに

本研究では、パッケージエアコン (以下 PAC) を用いた膜天井放射空調¹⁾の冷暖房性能の検討を行うことを目的とする。本報では、局所平均空気齢の結果から室内の冷気分配性能を評価する。加えて、本空調方式のメリットであるドラフト環境の改善について、室内の風速分布の結果から DR 値 (Draught Rate) を算出し、室内の快適性を検討する。

2. 局所平均空気齢

2.1 算出方法

本システムでは、PAC の給気口から膜を通して膜下空間へ流入する冷気の分配性能を評価するため、膜下空間の各測定点での局所平均空気齢を算出した。図 1 に空気齢算定の概要図を示す。PAC の給気口より発生させたトレーサーガスが PAC の還気口を通して再び給気口より給気されるため、対象空間へ流入する CO₂ 濃度は時々刻々と変化する。そこで、本報ではパルス解析²⁾を

用いた空気齢算出を試みた。PAC の給気口で M[m³/h] のガスを発生させるとき、給気口での単位パルスに対する濃度応答を Rp(t) とすると、式 (1) と表せる。C_{SA}(t) 及び Cp(t) が測定より既知であるため、Rp(t) を式 (3) と仮定し最小二乗法により Rp(t) を求め、式 (4) より局所平均空気齢 τ_p を算出した。図 2, 3 に Rp(t) 及び測定値 Cpm(t) と Cp(t) の一例を示す。

また、膜上空間から膜を通して膜下空間へ流入する冷気の分配性能についても同様に考える。膜上空間から Ca(t) のガスが膜下空間へ流入したとき、膜からのパルス発生に対する各測定点での局所平均空気齢を算出した。加えて、PAC からの名目換気時間は式 (5)、膜からの名目換気時間は式 (6) を用いた。

$$C_p(t) = \int_0^{\infty} M(t - \tau) R_p(\tau) d\tau \quad \dots (1)$$

$$C_{p1}(t) = \int_0^{\infty} Q_{SA} \cdot C_{SA}(t - \tau) R_p(\tau) d\tau \quad \dots (1')$$

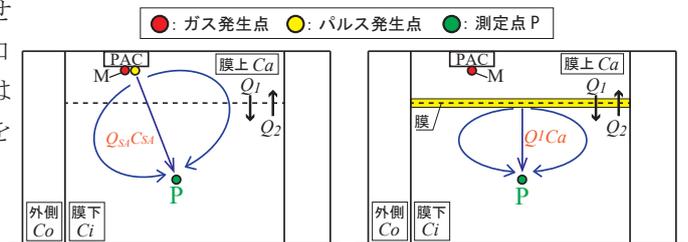
$$C_{p2}(t) = \int_0^{\infty} Q_1 \cdot C_a(t - \tau) R_p(\tau) d\tau \quad \dots (2)$$

$$R_p(t) = b \cdot e^{-c(t-a)} \quad \dots (3)$$

(ただし、t < a の時、R_p(t)=0)

$$\bar{\tau}_p = \frac{\int_0^{\infty} t R_p(t) dt}{\int_0^{\infty} R_p(t) dt} \quad \dots (4)$$

$$\tau_{n1} = \frac{V_i + V_a}{Q_{SA}} \quad \dots (5) \quad \tau_{n2} = \frac{V_i}{Q_1} \quad \dots (6)$$



(a) PAC からの空気齢 (b) 膜からの空気齢
 図 1 空気齢算定の概要図

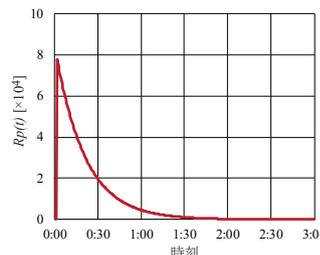


図 2 Rp(t)

条件: 膜 (不織布あり), Case1, P1, +2400

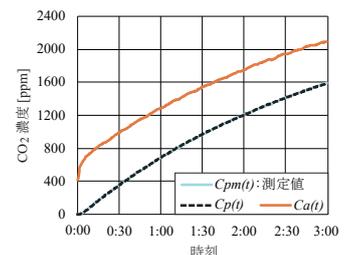


図 3 Cpm(t), Cp(t)

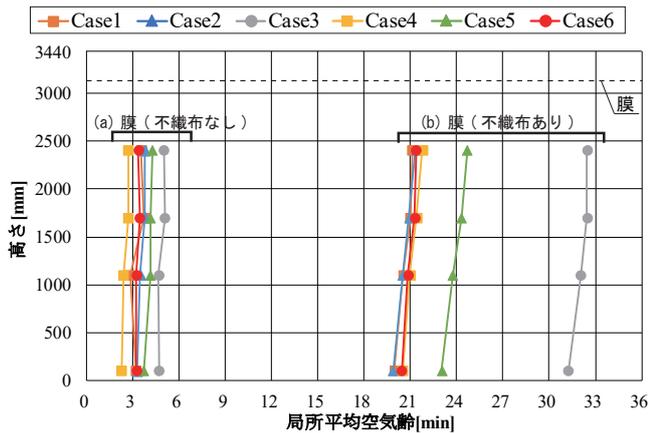


図4 PACからの局所平均空気齢 鉛直分布

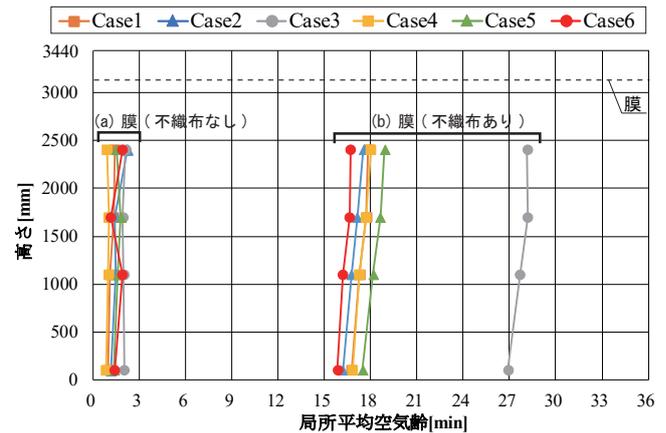


図5 膜からの局所平均空気齢 鉛直分布

表1 空気齢：膜（不織布なし）

		室平均空気齢[min] (赤字) 名目換気時間[min]		室空気 交換効率 [-]	給気量 [m³/h]	室平均有効 給気量 [m³/h]
		■	■			
PACからの 空気齢	Case1	1.8	3.3	0.27	Q _{S4}	2032
	Case2	1.8	3.6	0.25		2032
	Case3	2.5	4.9	0.26		1434
	Case4	1.8	2.5	0.36		2032
	Case5	1.8	4.1	0.22		2032
	Case6	1.8	3.3	0.27		2032
膜からの 空気齢	Case1	1.2	(3.0)	(1.25)	Q _I	1105.9
	Case2	1.6	(3.0)	(0.96)		1105.5
	Case3	2.0	(3.0)	(0.74)		1110.8
	Case4	0.9	(3.0)	(1.62)		1103.7
	Case5	1.6	(3.0)	(0.96)		1107.2
	Case6	1.6	(3.0)	(0.95)		1107.5

*0) 内の名目換気時間, 平均空気交換効率は参考値

■ 室平均空気齢[min] ■ 名目換気時間[min]

表2 空気齢（膜（不織布あり））

		室平均空気齢[min] (赤字) 名目換気時間[min]		室空気 交換効率 [-]	給気量 [m³/h]	室平均有効 給気量 [m³/h]
		■	■			
PACからの 空気齢	Case1	1.8	20.7	0.04	Q _{S4}	2032
	Case2	1.8	20.7	0.04		2032
	Case3	2.6	32.0	0.04		1434
	Case4	1.8	21.2	0.04		2032
	Case5	1.8	23.9	0.04		2032
	Case6	1.8	21.0	0.04		2032
膜からの 空気齢	Case1	18.0	17.4	0.52	Q _I	202.6
	Case2	16.4	16.9	0.48		223.2
	Case3	26.8	27.7	0.48		136.4
	Case4	16.8	17.4	0.48		216.9
	Case5	17.7	18.3	0.48		205.9
	Case6	15.2	16.3	0.47		239.7
	Case1(旧)	40.4	41.1	0.49		82.5

■ 室平均空気齢[min] ■ 名目換気時間[min]

2.2 局所平均空気齢の鉛直分布

図4, 5にPAC・膜からの局所平均空気齢鉛直分布を示す。PAC・膜からの空気齢は全条件において、均一な鉛直分布であり、冷気が室下部まで到達していることがわかる。ケース間で比較すると、膜（不織布なし）条件ではケース間の差異は小さいが、膜（不織布あり）条件ではCase3(風量最小)のみが大きな値となっている。これより、PACの吹出風量が空気齢に与える影響が大きいと考えられる。また、膜（不織布あり）条件では、床面付近の測定点で局所平均空気齢が若干小さくなっている。これは、初めに壁近傍を伝って下降した冷気がいち早く、室中央に集まる測定点に到達している可能性が示唆される。

2.3 室全体での冷気分配性能評価指標

表1, 2に各ケースにおける算定結果を示す。(旧)は既報¹⁾の旧膜の結果である。室平均空気齢を膜の条件間で比較すると、膜（不織布あり）条件では、膜（不織布なし）条件の倍の値であることから、不織布の有無が冷気分配性能に与える影響は大きいと示唆される。また、膜からの空気齢Case1(基準)を旧膜ファン実験と本実験の膜を比較すると、空気齢が半分以下となっており、冷気分配性能の大幅な改善がみられる。次に、室の空間平均的な空気分配性能を表すために、式(7)を用いて室空気交換効率³⁾を算出した。膜（不織布あり）条件の膜から

$$\varepsilon_a = \frac{\tau_n}{2\langle\tau_p\rangle} \quad \dots (7)$$

の空気齢では、いずれのケースも約 0.5 であることから、完全混合状態が実現され、各測定点に一樣に冷気が行き届いていることが確認できた。

算定した空気齢から給気量を求め、到達した風量を表す室平均有効給気量を新たに定義した(式(8),(9))。膜(不織布あり)条件での膜からの室平均有効給気量と、前報⁴⁾で求めた膜を通した下向き交換空気量 Q_l が近い値であることから、膜を通過した冷気が室内全体に十分行き渡っていると考えられる。

$$Q_{ep} = \frac{1}{\langle \tau_p \rangle} \times (V_a - V_i) \dots (8) \quad Q_{em} = \frac{1}{\langle \tau_p \rangle} \times V_i \dots (9)$$

3. 風速分布

3.1 測定概要

風速測定は超音波風速計(DA-700型, TR-92T型プローブ:株式会社パナソニック)を用いて、定常状態を確認後に行った。測定間隔は10[Hz]、測定時間は1分間に設定した。測定点は平面図(図6)に示す18点設け、測定高さは1.1mに固定した。膜なし条件では測定点番号1~9の9点で測定した。

3.2 風速分布

図7に高さ1.1mにおける、下向きを正とした鉛直方向の風速分布を示す。青い部分は下向き気流、赤い部分は上向き気流を表している。また、膜の2条件の分布図下部にある黒枠の四角形は南東に位置するPACを示す。

膜なし条件(a)では下向き気流、膜ありの2条件(b),(c)では上向き気流が発生していることがわかる。下向き気流はPACからの吹出し気流、上向き気流は発熱体のブルームに起因するものだと考えると、ドラフトリスクの原因となるPACの吹出し気流を膜設置により緩和でき

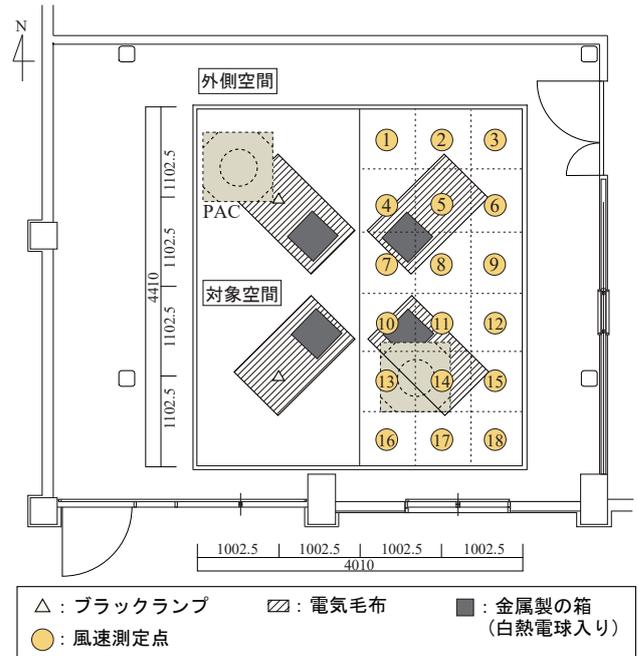


図6 平面図

ていることが示唆される。

PACの吹出し角度の違いでケース間比較すると、膜なし条件では大きな違いが見られた。Case1(基準・30°吹出し)では、PACから遠くに位置する壁際の測定点②で下向き気流が大きく、分布図全体的に下向き気流が確認できる。一方で、Case5(60°C吹出し)ではPAC近くに位置する測定点⑧で下向き気流が大きく、PACから遠くなるほど上向き気流が大きくなる分布となり、測定範囲内で風速の差が大きいことがわかる。よって、PACの設定条件により風速分布に大きな差が生じるため、状況に応じたPACの設定が必要である。また、膜の2条

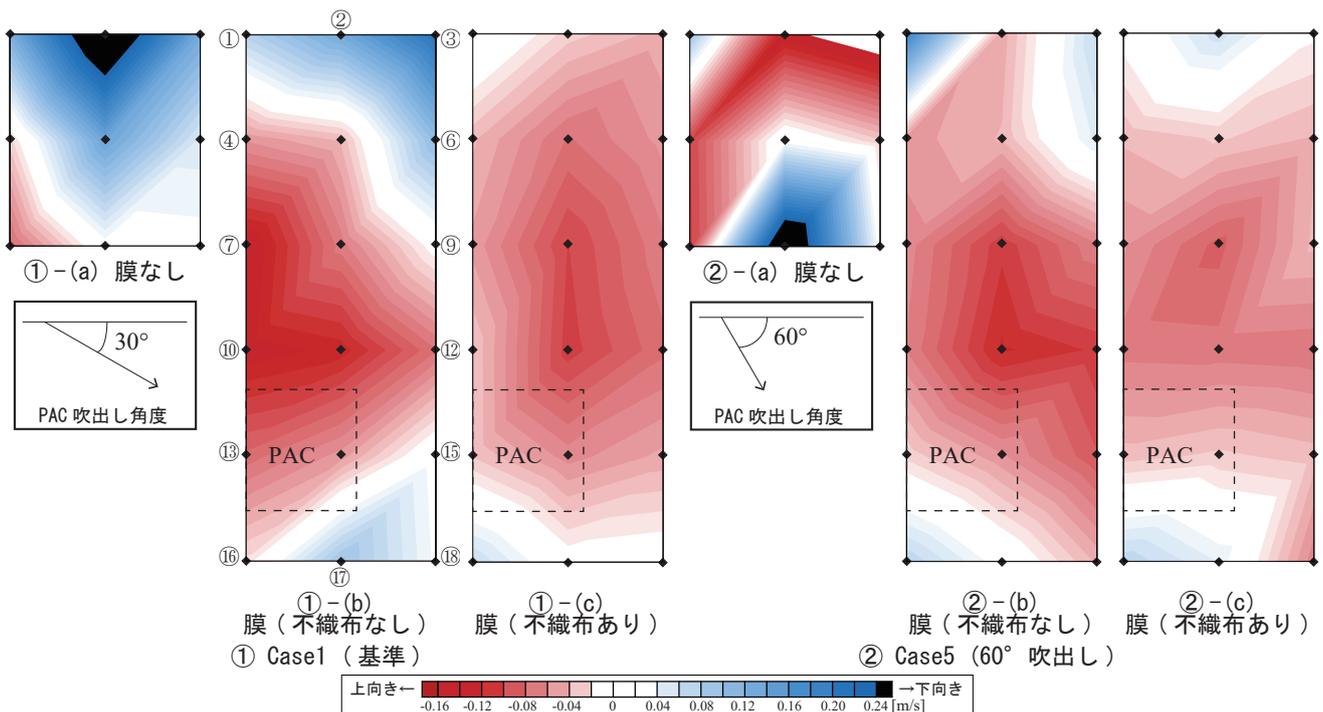


図7 鉛直方向の風速分布(高さ1.1m)

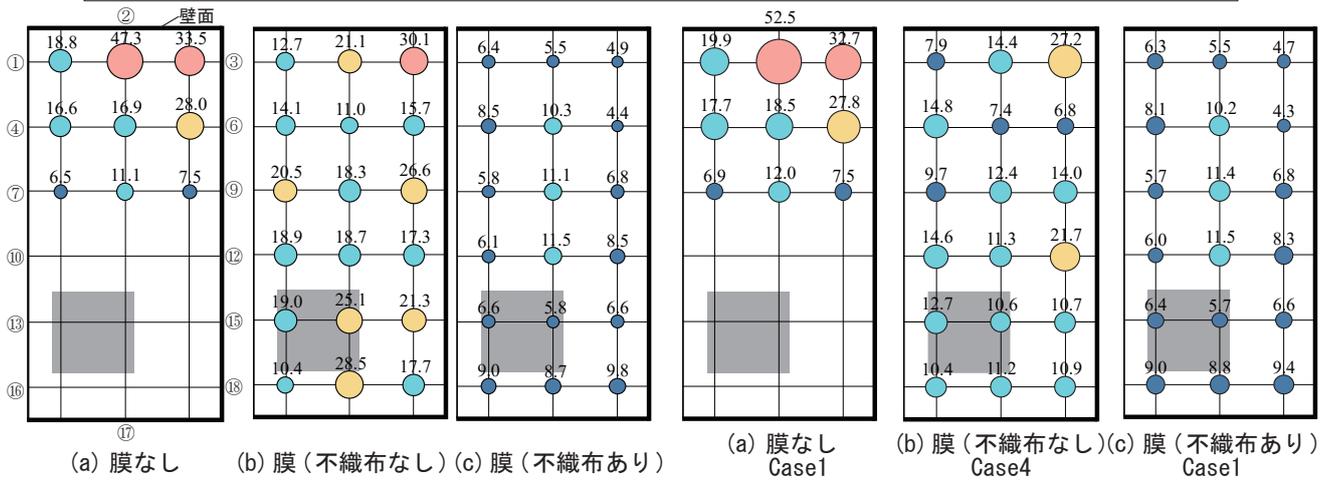


図 8 DR 評価 (高さ 1.1m), Case1

図 9 DR 評価 (高さ 1.1m), $t_p=24^{\circ}\text{C}$

件ではケース間で大きな差は見られなかった。

3.3 DR (Draught Rate)

ドラフト抑止効果の評価指標として、P.O.Fangar ら⁵⁾により提案された DR を用いる。ドラフトによる居住者の不満足者率を表す指標で、式 (10) により求める。

ISO 7730⁶⁾では $DR < 10\%$ でカテゴリ A、 $DR < 20\%$ でカテゴリ B、 $DR < 30\%$ でカテゴリ C と定められている。

$$DR = (34 - t_p)(\bar{U}_p - 0.05)^{0.62}(0.37\bar{U}_p T_u + 3.14) \dots (10)$$

DR の大きさをバブルの面積で表現し、結果を図 8, 9 に示す。また、温度によるパラメータをなくし、風速のみで DR 評価をするために、式 (10) で $t_p=24^{\circ}\text{C}$ に固定して、DR 評価を行った。この時、高さ 1.1 m における温度が 24°C に近いケースである、(a) 膜なし、(c) 膜 (不織布あり) 条件では Case1、(b) 膜 (不織布なし) 条件では Case4 を採用した。

膜の条件間で比較すると、(c) 膜 (不織布あり) 条件ではドラフト環境が改善され、多くの測定点がカテゴリ A 評価となった。また、測定点間での差は小さく、局所的なドラフトの発生は抑制されている。一方で、(a) 膜なし、(b) 膜 (不織布なし) 条件ではカテゴリ B, C 範囲にあり、測定点②, ③は $DR \geq 30\%$ で局所的に高リスクとなる箇所が発生した。図 7 の風速分布においても同様の傾向がみられた。これは 30° で吹出された冷気が壁近傍を伝

て下降し、影響を及ぼしていると考えられる。

4. おわりに

本報では、PAC を用いた膜天井放射空調方式において、冷気分配性能、ドラフト抑止効果の検討を行い、以下のような知見を得た。

- (1) 全ケースにおいて、局所平均空気齢 鉛直分布が均一であることから、冷気が室下部まで到達し、室内全体に十分行き渡っていると考えられる。
- (2) 冷気分配性能について、旧膜ファン実験と比較すると大きな改善がみられ、不織布の有無が及ぼす影響は大きいことが確認できた。
- (3) 膜なし、膜 (不織布なし) 条件では局所的にドラフトリスクとなる箇所が発生した。
- (4) 膜 (不織布あり) 条件ではドラフト環境が改善され、局所的なドラフトの発生は抑制されている。

以上より、膜の通気抵抗を小さくし、冷気分配性能の向上を図ると、同時にドラフト抑止効果は減少するため、最適な膜を選定する必要がある。

次報では、同実験での PAC の顕熱処理量、及び COP について報告する。

【参考文献】

- 1) 上村, 山中, 小林, 袁, 崔, 前田, 蔵永, 新宮, 小林: PAC を用いた膜天井放射空調の冷暖房性能に関する研究 (その 8) ~ (その 10), 空気調和・衛生工学会学術講演会論文集, pp329-340, 2019.9
- 2) 本田, 山中, 甲谷, 桃井, 相良, 上田, 前田: 低風速天井吹出し空調による病室の室内環境に関する研究—室内温度・汚染質濃度分布及び換気性能に関する検討—, 空気調和・衛生工学会論文集, No.238, pp19-24
- 3) HASS 115-2002: 室内換気効率の現場測定法・同解説, 空気調和・衛生工学会規格, pp14
- 4) 新宮, 山中, 小林, 袁, 崔, 前田, 上村, 安江: PAC を用いた膜天井放射空調の冷暖房性能に関する研究 (その 13) グローブ温度及び膜上下交換空気量の同定, 空気調和・衛生工学会学術講演会論文集, 2020.9 掲載予定
- 5) Fanger, P.O., A.K.Melikov, H.Hanzawa and J.Ring: Air Turbulence and Sensation of Draught, Energy and Buildings, 12(1988) pp21-39, 1988
- 6) ISO 7730: Moderate thermal environment-Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort, International Organization for Standardization, 2005

【記号表】

C_p : 点 P における CO_2 濃度 [-]	$C_{s,i}$: 給気 CO_2 濃度 [-]
C_a : 膜上空間 CO_2 濃度 [-]	M : CO_2 発生量 [m^3/min]
Q_i : 下向き交換空気量 [m^3/min]	$Q_{s,i}$: 給気量 [m^3/min]
Q_{ep} : PAC からの室平均有効給気量 [m^3/h]	
Q_{em} : 膜からの室平均有効給気量 [m^3/h]	
V_a : 膜上空間体積 [m^3]	V_i : 膜下空間体積 [m^3]
τ_p : 局所平均空気齢 [min]	τ_n : 名目換気時間 [min]
R_p : インパルス応答関数 [$1/\text{m}^3$]	ε_n : 室空気交換効率 [-]
DR: Draught Rate [%]	t_p : 局所温度 [$^{\circ}\text{C}$]
\bar{U}_p : 平均スカラー風速 [m/s]	T_u : 乱流強度 [%]

【謝辞】

本研究は、(株)竹中工務店との共同研究であり、関係者各位に謝意を表します。