

大学講義室内における置換換気性能に関する研究
Performance of Displacement Ventilation in a University Lecture Hall
(Part3) Effect of contaminant source position on transient spread of contaminant based on
CFD analysis

Aya ESSA*1 Toshio YAMANAKA *1 Tomohiro KOBAYASHI *1 Narae CHOI *1

*1 Osaka University

Displacement ventilation (DV) is considered an energy saving air conditioning system and is especially recommended for classrooms for providing cool clean air in the occupied zone. However, in the current pandemic situation, ventilation systems should be assessed in terms of infection-spread prevention as well. Hence, this paper aims at investigating the contaminant spread from a single source mimicking one infected individual scenario. Transient simulations were carried out to monitor the diffusion pattern of one pulse emission (exhale). The diffusion direction, speed and dispersion rate were observed and accordingly relatively safe and risky case-scenarios were highlighted among the case-study's ventilation system design.

Introduction

Displacement ventilation (DV) is a buoyancy dependent ventilation system which rely on heat sources inside the space to heat the cool air supplied at low velocity from inlets located near the floor. As air in the occupied zone gains heat it ascends washing along the contaminants upwards and entraining cool clean air from the supply. DV has been studied in multiple research work which investigated and proved its capability to reduce cross-contamination (1). One of the main space types in which DV is implement is educational spaces i.e. classrooms and lecture halls (2).

1. Analysis

The case-study chosen for this investigation is a mid-size university lecture hall (14m × 10m × 5m) of 120 student capacity, seated as shown in Fig.2a. The DV in the case-study differs from the typical system as inlet fans are placed on ceiling level supplying air to the wall-long flat diffusers through cavity walls. The diffusers are placed on the front and side walls as shown in Fig.1. The backside is an 8 m wide operable wall which allows expanding the room area to include the students lounge.

In order to study the effect of changing a single-contaminant-source location, 10 seats were selected based on the longitudinal symmetry of the hall, as highlighted in Fig.2a.. The standard $k-\epsilon$ model analysis was carried out using STREAM v.20 software using the conditions listed in Table.1. Fig.2b shows the simplified human model used in the simulations with the boundary conditions summarized in Table2.

The cases were simulated with CO₂ representing a passive

infectious contaminant emitted from the mouth of source occupant. Although gases and particles possess different properties, research has proved gases to be representative of the diffusion pattern of small particles, < 3mm size, emitted at low velocity (3). Thus, CO₂ concentration was set to 1000 assuming the units to be quanta/m³. For all cases, steady- state analysis with no emission were run until the temperature was stable, then, transient analysis was carried out for 50s, 2s to simulate one exhale then the emission was stopped to monitor contaminant diffusion.

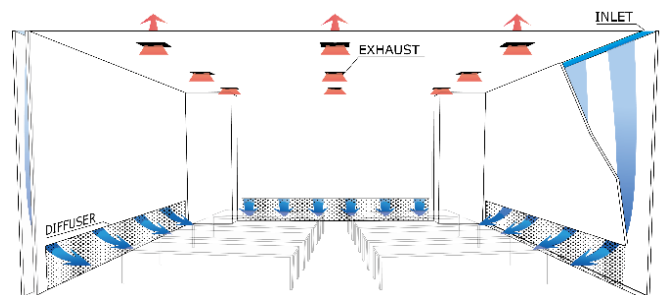


Fig.1 Displacement ventilation system in room

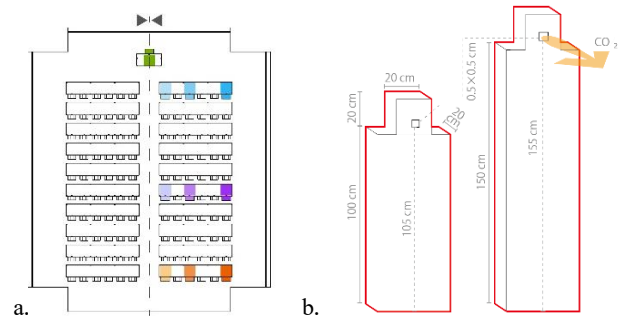


Fig.2 CFD model, a. Room plan with infected individuals highlighted, b. Occupants model

2. Results

In this section covers two main points: 1) Inspecting the temperature vertical distribution for DV stratification after reaching the steady state, and 2) Assessing the inhale air quality for the source, the uninfected occupants especially the source surrounding ones. For all uninfected occupants average inhaled air concentration is calculated. For contaminant source occupant, the inhale air quality is assessed in terms of stagnant time, i.e. how long high contaminant concentration is sustained. For source surrounding occupants, the number of affected occupants and effect severity by time are two factors chosen for evaluation.

To start with, the temperature vertical distribution shows typical stratification with interface height of above 1.7 m in most of the space volume. Fig.3 shows 2 graphs of the temperature vertical distribution; a. whole space average with variance bars, b. Breathing zone average of 4 different rows

Table.1 Analysis Conditions

Analysis Software	Stream v.20
Turbulence model	Standard k-ε model
Calculations	Heat, Radiation, Diffusion (CO ₂)
Mesh count	~4M
Mesh size	0.04 m (1.1 growth rate)

Table.2 Boundary Conditions

Wall	Inner wall	Heat transfer coefficient, 3.06 W/m ² K	
	Exterior	Adiabatic	
Inflow	Front	2850m ³ /h	Sides 4530m ³ /h
Outflow	Fixed flow velocity 0.98 m/s		
Heat	60 W/ person		
CO ₂ emission	Emission velocity	1 m/s	
	Concentration:	1000 quanta/m ³	
	Mouth surface area	0.0025 m ² (0.05×0.05 m)	
	Duration	2 s	

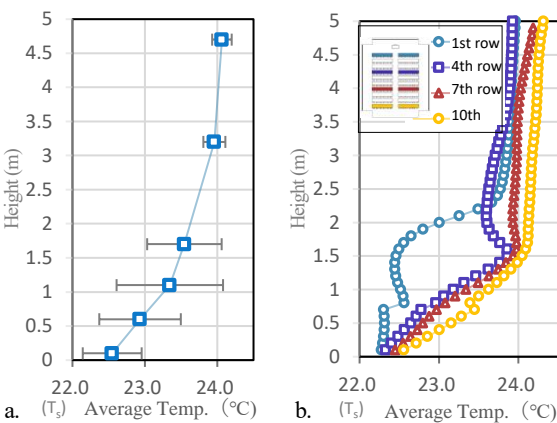


Fig.3 Temperature vertical distribution a. Whole space horizontal plane average with variance b. Breathing zone average of 4 different rows

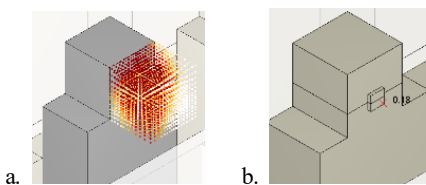


Fig.4 Contaminant measuring points, a. sample volume at source, b. measuring point at all other occupants

and graph b has the temperature at 4 sample rows plotted to represent the variation in the temperature distribution in the seating zone of the hall. Table.3 shows the temperature distribution at 4 horizontal sections, 3 sections within the occupied zone; at ankle level, seated and standing occupants head level, and one above the occupied zone at 3.2 m. Three vertical sections are presented as well in side and middle aisle, and through the seating zone. As can be observed from Fig.3b, the front row is affected by the front diffuser which can be the cause of the asymmetric air flow. This observation, as mentioned in (Part 2) can affect the contaminant distribution as well.

Regarding the contaminant diffusion assessment, the concentration in the source breathing zone was calculated using the average of 0.2 m cube in front of the occupant's face. For other occupants, a single measuring point in the center of the first mesh next to the mouth was used to derive the concentration as shown in Fig.4.

Table.3 Temperature horizontal and vertical contours

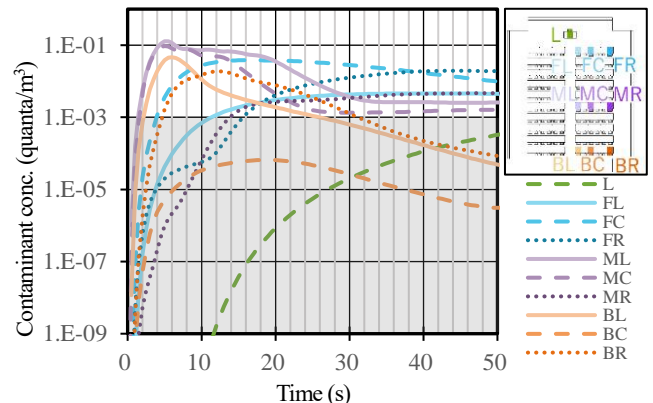
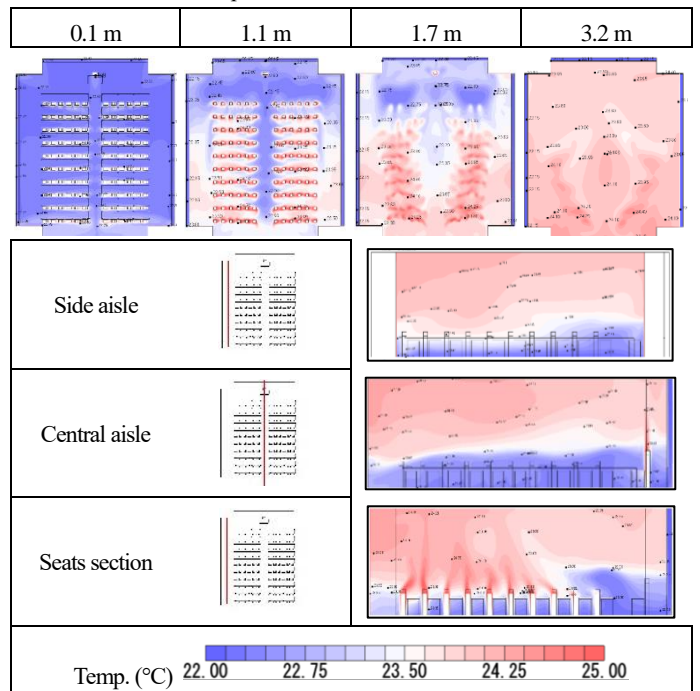


Fig.5 Contaminant concentration at source breathing zone vs time

Average contaminant concentration in inhaled air of all uninfected occupants for the ten cases are plotted in Fig.5. It can be observed that 4 cases reached relatively high concentrations: ML, MC, BL, and FC. Although, the middle cases had the highest concentrations (> 0.1 quanta/ m^3), case-FC sustained 0.01 quanta/ m^3 for 40 s. Other cases showed negligible concentrations. Case-L, however, showed a delayed increase in concentration that had not reached a peak until the end of the simulation time.

Table. 4 shows the inhaled contaminant concentration the source and surrounding occupants for all ten cases vs. time. First, regarding the stagnant time at the source, it can be noticed that cases L, FL, and FC had slow dispersion rate as it takes around 40 s for the concentration to reach 1 quanta/ m^3 while its takes under 10 s in case-BC, for example. Another point worth noting is the trend of re-peeking after steep decrease shown in cases ML and MC which is not restricted to the source but also the surrounding occupants. Assessing the effect on surrounding occupants, front cases have almost all surrounding occupants

above 0.1 quanta/ m^3 in varying timing, ML and MC cases subjected their adjacent occupant to the right to the highest concentration of more than 10 quanta/ m^3 . Followed by case-BL, ML and MC are the fastest cases to affect the surrounding occupants as the adjacent occupant reached the maximum concentration within 5 s. BC had no concentration exceeding 0.01 quanta/ m^3 which is unlike other back cases as both subjected an adjacent occupant to concentration higher than 1 quanta/ m^3 . Similar to Fig.5, the concentrations in case-L are increasing and had not reached its peak.

Finally, to visualize the diffusion direction, horizontal and vertical sections of sample cases are shown in Table.5 and Table.6 respectively. The difference in diffusion pattern can be seen in terms of speed, direction, and dispersion rate. Back cases show fast vertical diffusion with minimal dispersion. In contrast, in middle cases the contaminant diffused horizontally. Front cases, on the other hand, show slow horizontal diffusion with high dispersion rate, thus, affecting larger number of occupants.

Table.4 Contaminant concentration at the mouths of occupants surrounding the source vs. time

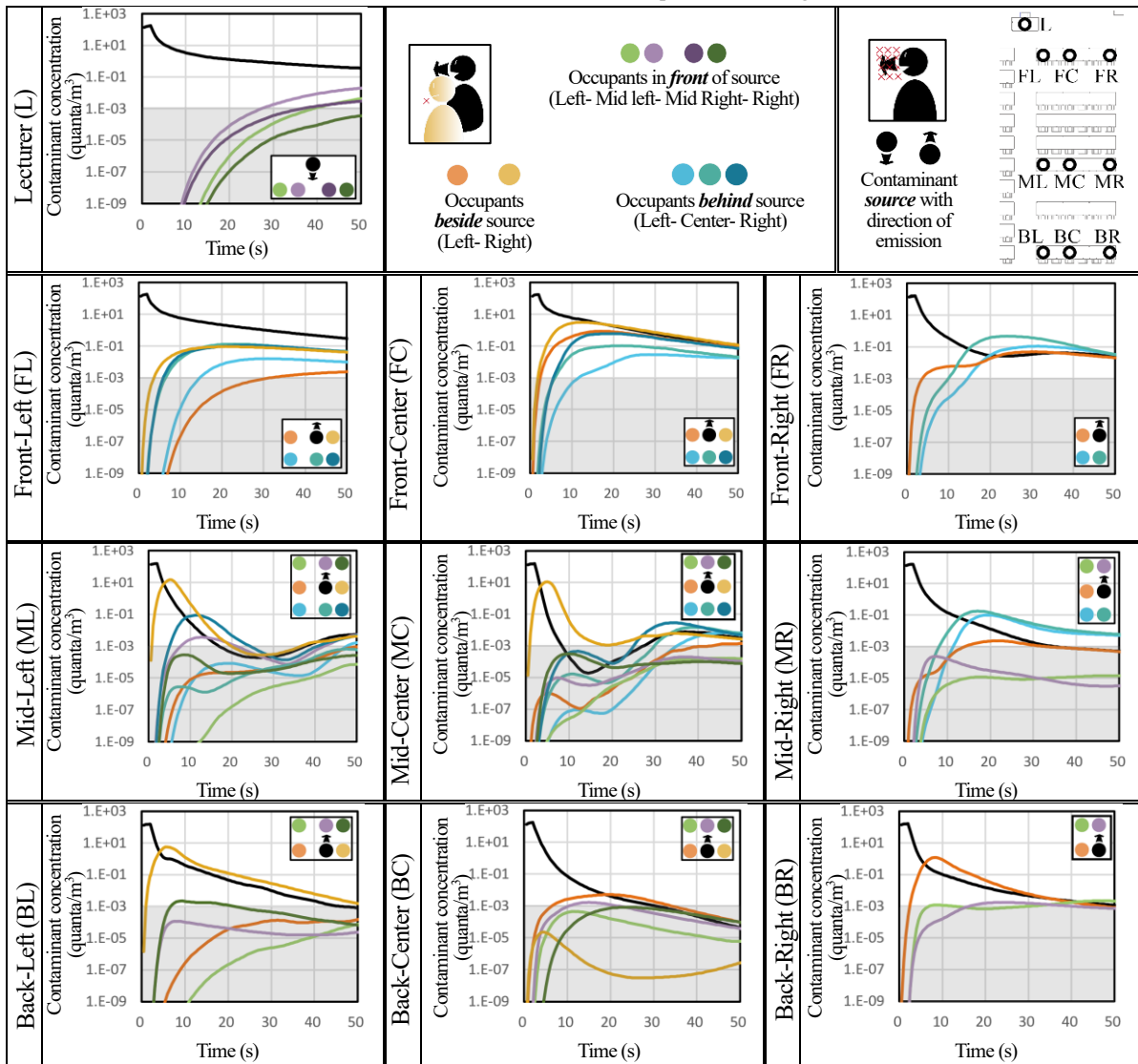


Table.5 Contaminant concentration at horizontal plane, 1.7 m for the standing source case-L and 1.1 m for the seated source cases

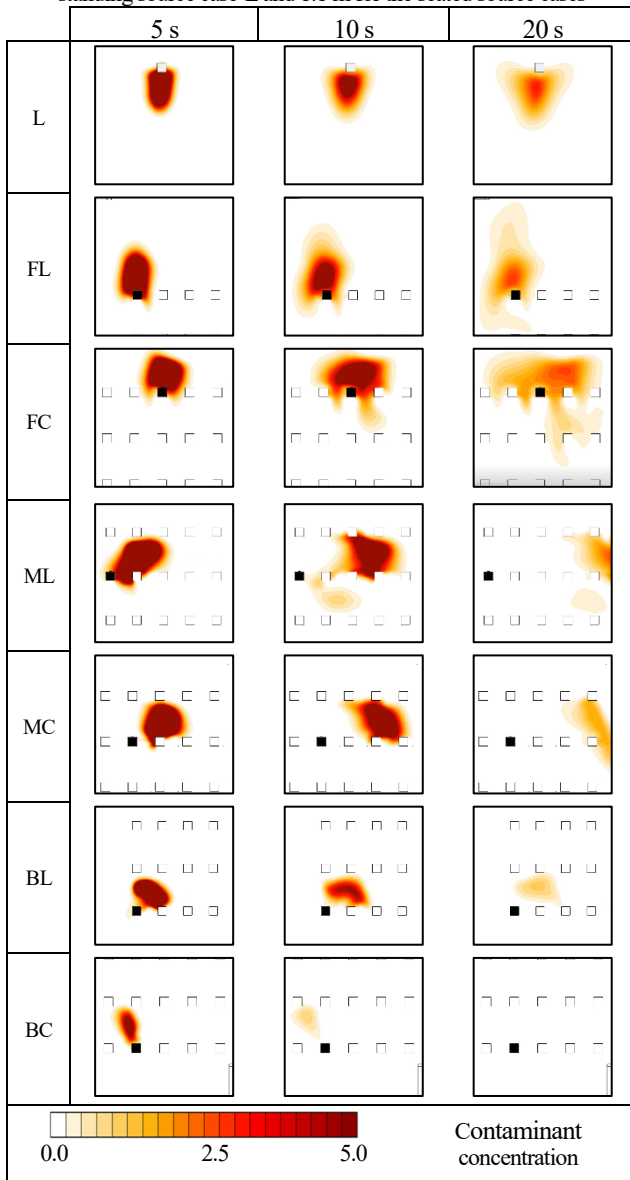
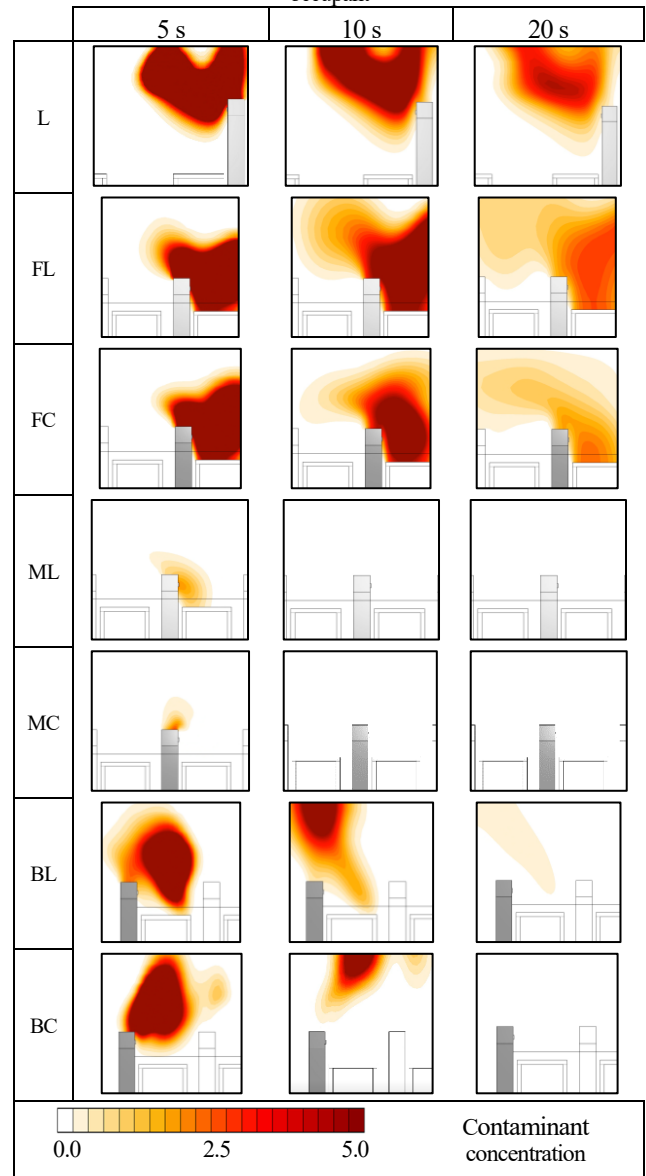


Table.6 Contaminant concentration on vertical plane through source occupant



3. Conclusion

It can be concluded the contaminant source occupant has varying effect severity according to his location in the room. Thus, it was observed that changing the source location has a significant effect on the adjacent occupants' air quality through the quantity of contaminants inhaled, the delay time until the contaminants reaches their breathing zone and the duration the contaminants stay within its range. In addition, the analysis results showed a clear relation between the source occupant location and his own inhaled air quality as well. This study supports the findings of the previous steady state simulation published in (Part 2), however, one significant addition of the transient results is that it highlighted the effect of buoyancy, despite the low speed horizontal air flows, in clearing the occupants' breathing zone by time.

Acknowledgement

This study is funded by Daikin Industries LTD. The authors are grateful to the people concerned.

References

- 1) Berlanga FA, de Adana MR, Olmedo I, Villafruela JM, San José JF, Castro F: Experimental evaluation of thermal comfort, ventilation performance indices and exposure to airborne contaminant in an isolation room equipped with a displacement air distribution system. *Energy and Buildings*, 2018.
- 2) Mundt, M., H. M. Mathisen, M. Moser, and Peter V. Nielsen: Ventilation effectiveness: Rehva guidebooks, 2004.
- 3) Y. Yin, J.K. Gupta, X. Zhang, J. Liu, Q. Chen, Distributions of respiratory contaminants from a patient with different postures and exhaling modes in a single-bed inpatient room, *Building and Environment*, 2011.

冷房設定温度が吸放湿材貼付による省エネルギー効果に及ぼす影響

Influence of Air-Conditioning Temperature Setting for Cooling on the Power Consumption Amount due to Applying Hygroscopic Material

○廣岡 志穂 (大阪市立大学) 岸本 嘉彦 (大阪市立大学)

Shiho HIROKA*1 Yoshihiko KISHIMOTO*1

*1 Osaka City University

In order to evaluate influence of air-conditioning temperature setting for cooling on the power consumption due to applying hygroscopic material, numerical calculations were carried out. The conclusions were as follows.

In both cold and warm districts, the power consumption decreases due to hygroscopic material even in case total heat load increases due to ones. For improvement the energy-saving effect of applying hygroscopic materials, it is effective to use the cooling at night when moisture absorption occurs in district with small heat load, to use the cooling during the day when moisture desorption occurs in district with large heat load.

1. 研究背景と目的

吸放湿材として多孔質材料を室内側表面に配置した場合に、吸放湿材がルームエアコン(以下「AC」と記す)の冷房負荷に及ぼす影響について、概念図を Fig. 1 に示す。吸放湿材の調湿効果は AC に対して必ずしも有利に働くわけではなく、潜熱負荷の増加と顕熱負荷の減少が同時に発生し、一般に全熱負荷としては増加する可能性が高い¹⁾。しかし近年、空調機容量に対し冷房顕熱負荷が低い場合においては、吸放湿材の併用によって AC の消費電力量が減少する例が報告されている²⁾。つまり、寒冷地のような冷房顕熱負荷の低い地域では省エネルギー効果を示す可能性がある。

また、一般に住宅の熱負荷計算を行う際、地域によらず同一の運転スケジュールや設定温度によるシミュレーションが使用される。しかし、実際の冷房利用実態として、設定温度や運転スケジュールは地域や世帯によって異なる³⁾。そのため、実際の吸放湿材と AC の併用による省エネルギー効果を把握するためには、利用実態を考慮した計算条件による検討が必要である。

以上より、本研究では、冷房設定温度が吸放湿材による省エネルギー効果に及ぼす影響に着目し、寒冷地と温暖地の両地域において、吸放湿材の併用が省エネルギー効果を生む要因について明らかにすることを目的とする。

2. 計算条件と検出方法

計算対象住宅は、Fig. 2 に示す 1 室モデルと想定した木造平屋住宅とする。Table 1 に壁体に用いた材料物性値を示す。また、本研究では軟質繊維板を吸放湿材とし、吸放湿材の最大効果を把握するため、室内側表面全面に軟質繊維板を貼付した。

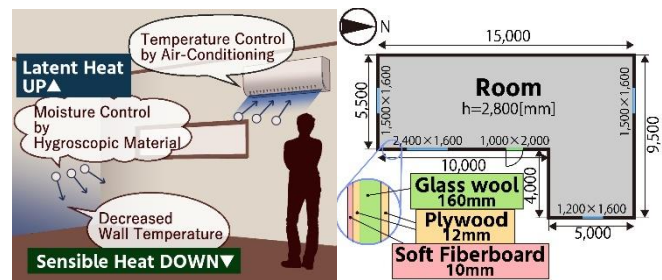


Fig. 1 Relationship between AC and hygroscopic material

Fig. 2 Object of calculation (Floor plan)

Table 1 Material properties

Material	Volumetric specific heat [kJ/m ³ K]	Thermal conductivity [W/mK]	Moisture conductivity [kg/mh(kg/kg ²)]	Hygroscopic properties κ [kg/m ³ (kg/kg ²)]	Hygroscopic properties ν [kg/m ³ K]
Soft fiberboard	311.5	0.064	0.0177	8148	3.33
Multi-layered glass	1.95	0.072	0	-	-
Glass wool	20.1	0.049	0.0979	-	-
Plywood	1165.6	0.1	0	-	-

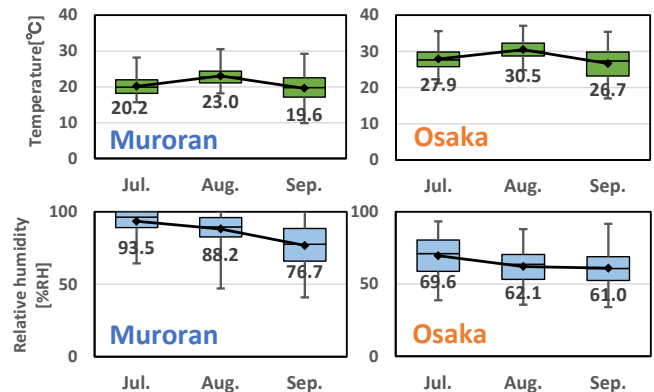


Fig. 3 Outdoor temperature and humidity (in Muroran and Osaka)

居住者は、成人男性 2 名、成人女性 2 名からなる 4 人家族を想定した。生活パターンについては、平日、休日を設定し、前報⁴⁾の計算条件を参考とした。

AC 運転については、室温が設定温度を超える場合に AC が自動的に運転される終日運転を想定し、設定温度 20[°C]から 30[°C]まで 1[°C]ごとの 11 条件と、終日 AC の運転をしない条件を加えた計 12 条件とした。また、窓は終日閉じているものとし、0.5[回/h]の強制換気を与えた。

外界条件については、温暖地として大阪府大阪市、寒冷地として北海道室蘭市を対象地域とし、拡張アメダス気象データから 2010 年 6 月 1 日～9 月 30 日の温度、相対湿度、絶対湿度、日射量を用いた。各地点の外気温湿度の四分位と平均値を Fig. 3 に示す。

数値計算には、熱水分同時移動方程式(κ-vモデル)を用いた。吸放湿材については、壁体表面の湿気伝達率を 0 とした場合を「吸放湿なし」、15.2[kg/m²h(kg/kg['])]とした場合を「吸放湿あり」と定義する。

AC の解析モデルについては、時々刻々の空調処理熱量に応じて、凝縮器、蒸発器における冷媒温度および COP を算出可能とする空調モデル⁵⁾を用いた。解析に用いた AC の諸元を Table 2 に、それに基づく冷房負荷と COP の関係を Fig. 4 に示す。消費電力量については、時々刻々の空調処理全熱量をそれに対応する COP で除すことにより得られる。計算期間は 2010 年 6 月 1 日～9 月 30 日、6 月を助走期間として、7 月 1 日～9 月 30 日の 3 カ月間を検討対象とした。

3. 冷房設定温度と吸放湿材が処理熱量や消費電力量に及ぼす影響

吸放湿材貼付による各 AC 処理熱量(顕熱、潜熱、全熱)の増加量を Fig. 5 に示す。処理顕熱量について、室蘭市では大阪市より減少率が高く、各月において平均外気温より約 4[°C]高い設定温度にて減少量が最大となる。また、大阪市の 8 月以外では、設定温度を上昇させるほど減少量が増加することがわかる。

処理潜熱量の増加量が最大となる設定温度は、室蘭市の 7、8、9 月、大阪市の 7 月では、平均外気温とほぼ等しい。大阪市の 8、9 月については、設定温度による増加量の変動はまばらであるが、増加率としては比較的低い。

処理全熱量について、吸放湿材貼付による増加量は約 -50～+150[MJ]となり、算出される増加率は-15～+5[%]程度であった。

吸放湿材貼付による各月の消費電力増加量・増加率を Fig. 6 に示す。以降、値が負の場合は、減少量、減少率と称す。減少量は、室蘭市より大阪市において多いが、減少率は、大阪市より室蘭市において高い。これは、室蘭市における消費電力量が大阪市より少ないため、減少量がわずかでも消費電力減少率としては相対的に上昇したと考

Table 2 Specifications of AC

Capacity	Min.	Rated	Max.
Cooling load[kW]	0.8	4	4.3
Electric energy consumption[W]	165	1835	2000

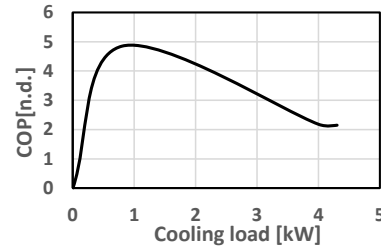


Fig. 4 Relationship between cooling load and COP

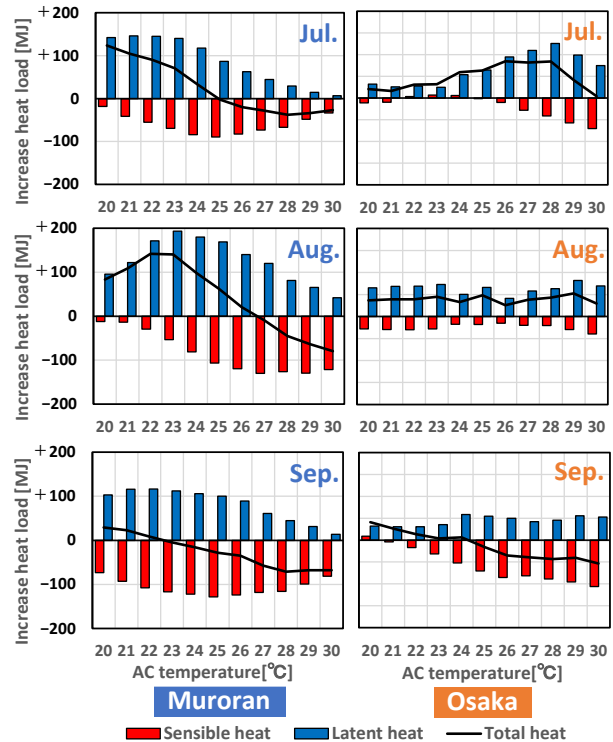


Fig. 5 Variation of increase of heat load due to AC temperature

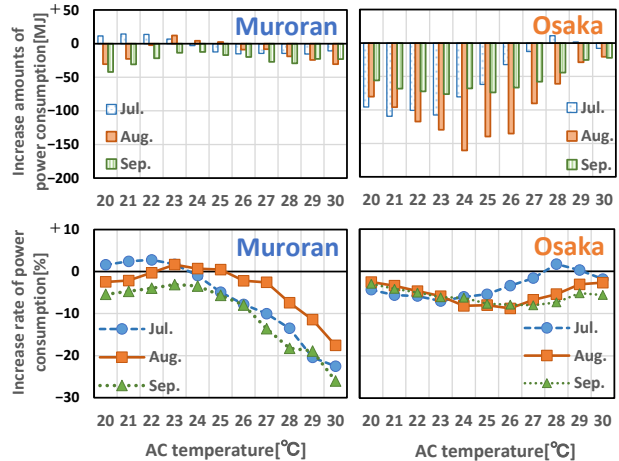


Fig. 6 Variation of increase of heat load due to AC temperature (upper : increase amounts, lower : increase rate)

えられる。

以上より、**Fig. 5** の全熱増加量と **Fig. 6** の消費電力増加量を比較すると、寒冷地と温暖地の両地域において、吸放湿材の貼付によって処理全熱量が増加する場合でも、消費電力量としては減少していることがわかる。

4. 冷房と吸放湿材の併用による省エネルギー効果の要因

本章では、吸放湿材による省エネルギー効果の発生要因を明らかにするために、寒冷地と温暖地における COP の出現頻度分布や経時変化を検討する。

4.1 冷房設定温度の影響

室蘭市と大阪市のそれぞれについて、設定温度が 20, 25, 30[°C] の条件における 8 月の COP 出現頻度分布を **Fig. 7** に示す。ここでは吸放湿なしの条件(図中"not HM")に着目して検討する。

設定温度 20[°C] の場合の室蘭市において 3[n.d.] 付近(以下、「a 点」と) 5[n.d.] 付近(以下、「b 点」)に COP の出現頻度のピークがある。図には示していないが、この条件下では冷房が昼間のみ運転しており、COP が低い a 点は昼間の冷房運転時、COP が高い b 点は運転時より高効率となる冷房発停時の COP がそれぞれ現れたものである。

設定温度 20[°C] の場合の大阪市において、1.5[n.d.] 付近(以下、「c 点」と) 3.5[n.d.] 付近(以下、「d 点」)に COP の出現頻度のピークがある。図には示していないが、この条件下では冷房はほぼ終日運転しており、COP が低い c 点は日中の冷房運転時、COP が高い d 点は夜間もしくは涼しい日における冷房運転時の COP が現れたものである。

設定温度を上昇させると、室蘭市の場合、昼間の冷房運転時間が減少するため、c 点から徐々に出現頻度が減少していることがわかる。大阪市の場合、暑い昼間ではなく涼しい夜間の冷房運転時間が減少するため、b 点から徐々に出現頻度が減少している。その結果、設定温度の上昇に伴い室蘭市の平均 COP は上昇するが、大阪市の平均 COP は低下する。

また、室蘭市と大阪市において、外気温度と設定温度の差が減少するほど同時刻の COP は上昇するため、a 点、b 点、c 点および d 点の COP は平均外気温度付近の設定温度において最大値を示す。

4.2 吸放湿材の影響

Fig. 7 より、4.1 項で述べた各出現頻度ピークについて、吸放湿材を貼付すると(図中"HM"), COP が低い a 点や c 点は高効率側に、COP が高い b 点や d 点は低効率側に移動していることがわかる。

ここで、室蘭市における、冷房運転の処理全熱量、消費電力量および COP の日変動の一例(8 月 26 日~27 日の 48 時間)を **Fig. 8** に示す。また、吸放湿ありの条件における各時刻の吸放湿量の正負により判定し、吸放湿材が放湿・

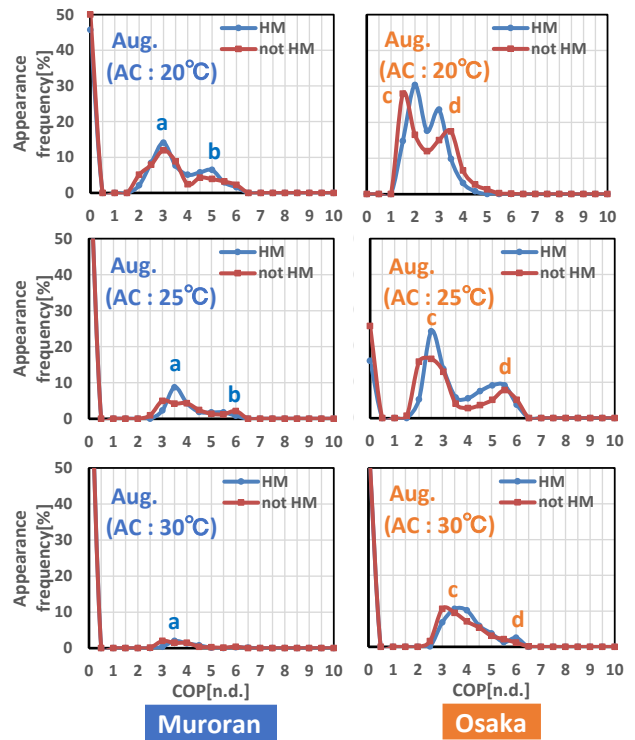


Fig. 7 Appearance frequency distribution of COP at each AC temperature (Aug.)

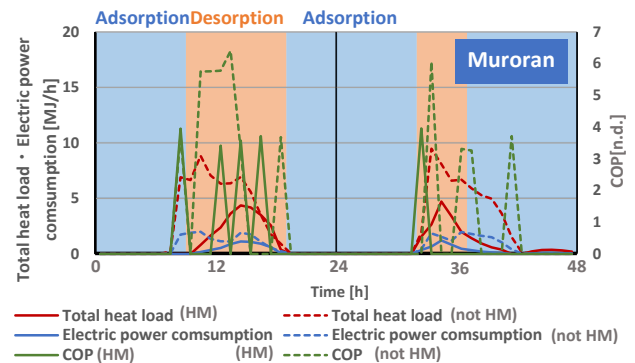


Fig. 8 History of total heat load, electric power consumption, and COP in Muroan (Aug.)

吸湿している時間帯についても併記する。

Fig. 8 より、既往研究²⁾と同様に、吸放湿材が放湿する昼間では、処理全熱量が減少した。しかし、吸湿に転じた夜間では、冷房は運転していないため、吸放湿材の有無に関わらず処理全熱量はほぼ 0 である。つまり、積算処理熱量は減少する。また、吸放湿なしの場合、昼間の運転時には COP は 6[n.d.] 付近(前述の b 点)となるが、吸放湿ありの場合は 3.5[n.d.] 付近(前述の a 点)に低下する。結果として、処理全熱量が小さい地域では、吸放湿ありの条件において消費電力量が吸放湿なしの条件より常に小さくなることにより、COP が低下としても、終日、吸放湿材貼付による省エネルギー効果を得られる可能性がある。

同様に、大阪市における、冷房運転の処理全熱量、消費電力量およびCOPの日変動の一例(8月10日～11日の48時間)を Fig. 9 に示す。Fig. 8 と同様に、吸放湿ありの条件における各時刻の吸放湿量の正負により判定し、吸放湿材が放湿・吸湿している時間帯についても併記する。

室蘭市と同様に、吸放湿材が放湿する昼間では、処理全熱量は減少し、一方で、吸湿に転じる夜間では増加する。つまり、積算処理熱量は増加する。また、吸放湿材の貼付により COP は昼間に上昇し、夜間に低下するため、大阪市とは定性的傾向が逆になる。結果として、消費電力量は、処理全熱量の増減と同様に、吸放湿材の貼付によって昼間は増加し、夜間は減少する。つまり、処理全熱量が大きい地域では、夜間よりも昼間の冷房運転時間の比率が高いほど、省エネルギー効果を得られる可能性がある。

そこで、室蘭市と大阪市において、COP 変動の定性的傾向が吸放湿材貼付効果により逆になる要因について検討するために、室蘭市と大阪市における AC 処理熱量と COP の関係を示した模式図を Fig. 10 に示す。

室蘭市は処理熱量が小さい地域であるため、Fig. 10 のように COP が最大となる処理熱量よりも小さい範囲において AC が運転する頻度が多い。そのため、昼間の放湿による処理熱量の減少は、室蘭市では冷房運転時の平均 COP を低下させる。一方、大阪市は処理熱量が大きい地域であるため、COP が最大となる処理熱量よりも大きい範囲において AC が運転する頻度が高い。よって、大阪市の冷房運転においては、昼間の放湿による処理全熱量の減少は平均 COP を低下させ、夜間の吸湿による処理熱量の増加は平均 COP を上昇させる。

したがって、吸放湿材貼付による省エネルギー効果は、寒冷地のように処理熱量が小さい地域の場合、吸湿が生じる夜間での冷房利用において効果が高く、温暖地のように処理熱量が大きい地域の場合、放湿が生じる昼間での冷房利用において効果が高くなると説明できる。

5. まとめ

本研究では、寒冷地および温暖地の両地域において、吸放湿材と AC を併用した空調システムを採用した戸建住宅を対象とし、冷房設定温度が吸放湿材貼付効果、すなわち調湿効果および省エネルギー効果に及ぼす影響について数値解析により検討した。そして、吸放湿材の有無や冷房設定温度が室内の水分移動や熱負荷に与える影響を把握し、吸放湿材貼付によって得られる調湿効果および省エネルギー効果が増減する各要因について考察した。以下に結果を示す。

- 1) 寒冷地、温暖地ともに、吸放湿材の併用によって処理全熱量が増加する場合でも、消費電力量は減少した。
- 2) 吸放湿材による省エネルギー効果と冷房設定温度の関係には、処理熱量の増減に伴う COP の定性的傾向

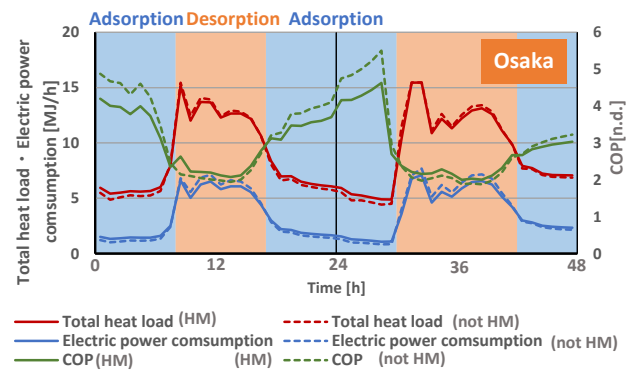


Fig. 9 History of total heat load, electric power consumption, and COP in Osaka (Aug.)

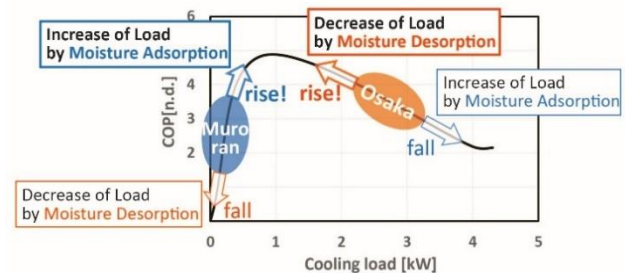


Fig. 10 Schematic diagram of variation of heat load and COP in cold and warm districts

が大きく影響している。処理熱量が小さい場合は吸湿、処理熱量が大きい場合は放湿によって COP が増加する。そのため、吸放湿材貼付による省エネルギー効果を上昇させるためには、寒冷地のように処理熱量が小さい地域では吸湿が生じる夜間の冷房利用が効果的であり、温暖地のように処理熱量が大きい地域では放湿が生じる昼間の冷房利用が効果的である。

参考文献

- 1) 坂本 雄三, 松尾陽, 永井明寛, 金垣龍:「潜熱負荷と湿度変動に及ぼす室内備品類の吸放湿性に関する研究 その 2 シミュレーションによる吸放湿材の影響に関する検討」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, pp.317-318, 1996.
- 2) 巽佑介, 小椋大輔:「吸放湿材が室内温湿度性状および空調負荷に及ぼす影響の検討」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, pp.239-240, 2014.
- 3) 岸本嘉彦, 梅宮典子:「寒冷地の住宅における冷房発停生起条件に関する研究」, 第 49 回空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, A42, 2020.
- 4) 佐藤亮太, 高橋光一, 岸本嘉彦:「寒冷地の戸建住宅における冷房・自然換気の利用実態に基づく吸放湿材の省エネルギー効果の検討」, 日本建築学会大会学術講演概論集, D-2, pp.193-194, 2017.
- 5) 上野剛, 宮永俊之, 占部亘, 北原博幸:家庭用エアコンの熱源特性モデルの開発・その 1 冷房時モデル, 電力中央研究所報告, pp1-18, 2010.

室内の CO₂濃度が人の生産性と生理心理量に及ぼす影響に関する研究
—タイピング・計算による作業性・疲労度の検証—

Study on the effect of indoor CO₂ concentration on human productivity, physiological and psychological quantity
-Verification of workability and fatigue level by typing and calculation-

○坂井 遥祐 (立命館大学) 近本 智行 (立命館大学) 具島 豊治 (パナソニック株式会社)
湯浅 明子 (パナソニック株式会社) 信長 賢輝 (パナソニック株式会社)

Yosuke SAKAI*1 Tomoyuki CHIKAMOTO*1 Toyoji GUSHIMA*2 Akiko YUASA*2 Masaki NOBUNAGA*2

*1 Ritsumeikan University *2 Panasonic Corporation

In this study, subject experiments were conducted to clarify the effect of indoor CO₂ concentration on workability and to investigate the relationship between indoor CO₂ concentration and physiological psychological amount. As a result, it was shown that the error rate of the workability test tended to increase depending on the CO₂ concentration, and the concentration ratio tended to decrease. It was also suggested that pulse affects PCO₂.

1. はじめに

CO₂は人間には知覚されないガスであるが、高濃度であれば人間の健康に影響を及ぼすと言われている。実際に50000ppmを超えるなど、非常に高濃度のCO₂ではめまいや頭痛など健康上のリスクをもたらす可能性がある(許容可能な室内空気質のための換気、ASHRAE Standard 62. -2016)。また、CO₂濃度は執務者のパフォーマンスにも影響を与える可能性があり^{文1) 文2)}、筆者らは5000ppm以下を対象に、CO₂濃度が作業性に与える影響や生理メカニズムに与える影響を調査してきた^{文3) 文4)}。

そこで引き続き本研究では、室内のCO₂濃度が作業性に及ぼす影響と生理心理量との関係性を明確化することを目的とし、CO₂濃度を30分間で緩やかに上昇させた実験①と5分間で急上昇させた実験②の計2パターンの被験者実験を実施した。本稿ではまず、実験①の概要と結果について記述し、その後実験②について記述する。

2. 実験① (CO₂濃度 30分上昇) 概要

2.1 実験条件

実験①は2021年1、2月に、立命館大学びわこくさつキャンパス内にある恒温恒湿室にて行った。被験者は健康な男子大学生3名である。

2.2 実験ケース

実験ケースをTable.1に示す。また、CO₂濃度の変化のイメージをFig.2に示す。CO₂濃度は30分間かけ緩やかに上昇させていき、すべての実験において、誤差が100ppm以内に収まるよう濃度を制御した。

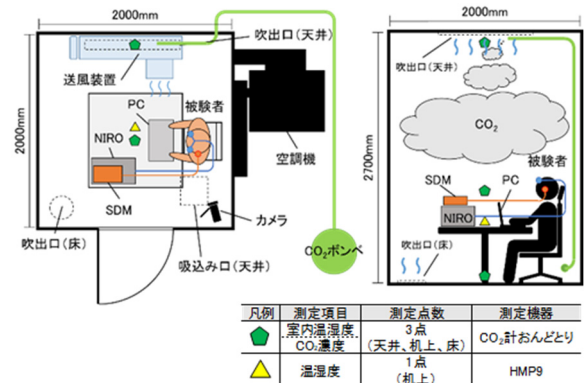


Fig.1 Laboratory (Experiment ①)

Table.1 Experimental case (Experiment ①)

	CO ₂ 濃度	温度	相対湿度	着衣量	状態
case1-1	600ppm	25°C	50%RH	0.8clo	椅座
case1-2	1000ppm				
case1-3	2000ppm				
case1-4	3500ppm				

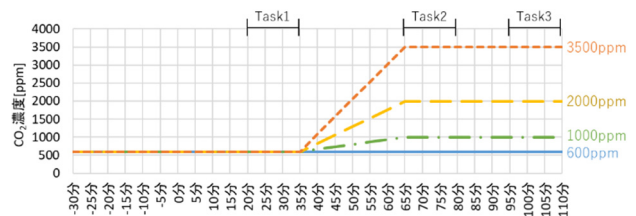


Fig.2 CO₂ concentration (Experiment ①)

2.3 作業性テスト

作業性テストとして、100マス計算とタイピングを実施した。100マス計算はケース毎に問題を変更しているが、難易度が統一されるよう全て2桁×1桁で構成し、解く順序も固定した。また、タイピングはフリーソフトである

「TypeLighter」を使用した。

2.4 測定項目

生理量の測定項目を Table.2 に示す。また、心理量の調査として、Table.3 に示した項目でアンケートと Table.4 に示した項目で自覚症しらべ^{注1)}を実施した。

Table.2 Measurement item (Experiment ①)

機器名	測定項目	測定部位
SDM (経皮的血液ガスモニタリング)	PCO ₂ (血中二酸化炭素分圧)	耳たぶ
	SpO ₂ (動脈血酸素飽和度)	
	PR (脈拍数)	
ニロモニタ NIRO-200 (赤外線酸素モニタ装置)	ΔO ₂ Hb (酸素化ヘモグロビン濃度変化)	額
	TOI (組織に含まれるO ₂ Hbの割合)	
サーモクロン	平均皮膚温(7点法)	額など7点
手動式血圧計 HEM-6324T	血圧	上腕

Table.3 Questionnaire items (Experiment ①)

カテゴリー	内容	評価方法
環境的項目	明るさ/温冷感/湿度感/ airflow感/ 温熱環境満足度	7段階評価
	発汗	4段階評価
	よどみ感/ 空気環境満足度	7段階評価
心理的項目	ストレス	7段階評価
	集中度	7段階評価

Table.4 Awareness Questionnaire items (Experiment ①)

	各項目(1.まったくあてはまらない-5.非常によくあてはまる)
I 群(ねむけ感)	ねむい、横になりたい、あくびがでる、やる気がとぼしい、全身がだるい
II 群(不安感)	不安な感じがする、ゆううつな気分だ、おちつかない気分だ、いらいらする、考えがまとまりにくい
III 群(不快感)	頭がいたい、頭がおもい、気分がわるい、頭がぼんやりする、めまいがする
IV 群(だるさ感)	腕がだるい、腰がいたい、手や指がいたい、足がだるい、肩がこる
V 群(ぼやけ感)	目がしょぼつく、目がつかれる、目がいたい、目がかわく、ものがぼやける

2.5 実験手順

タイムスケジュールを Fig.3 に示す。濃度上昇前、上昇直後、上昇の 30 分後の計 3 回において、Task(作業性テストと主観申告)を実施した。

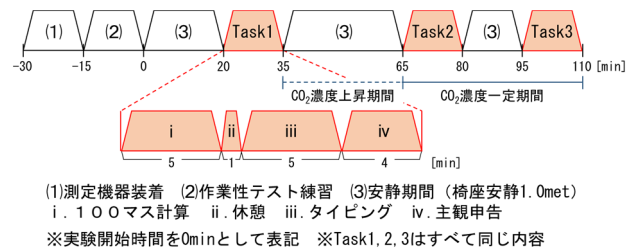


Fig.3 Time schedule (Experiment ①)

3. 実験① (CO₂濃度 30 分上昇) 結果

3.1 作業性テスト結果

タイピングと 100 マス計算のミス率の平均値を Fig.4 に示す。タイピングの結果においては、3 回目(濃度上昇の 30 分後)に 3500ppm のみでミス率が高い値を示した。100 マス計算においては、3500ppm で濃度上昇前に比べ上昇後にミス率が増加した。しかし、600、1000、2000ppm では CO₂濃度による影響は確認できておらず、CO₂濃度と生産

性の関係を調査するためには、もう少し CO₂濃度を高く設定した実験を実施する必要があると考えられる。

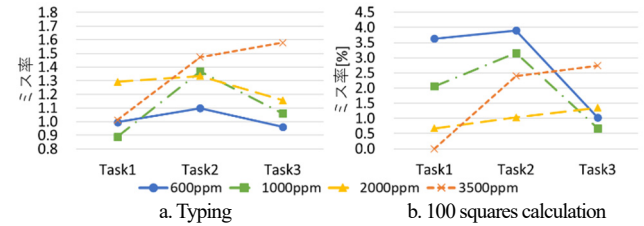


Fig.4 Error rate of workability test (Experiment ①)

3.2 慣れの影響

タイピングにおける KPM (1 分間当たりの入力キー数)と実験日の関係を Fig.5 に示す。被験者 A、B において、実験回数を重ねる度に被験者の KPM が上昇する傾向が確認できた。これは実験を重ねる毎に、被験者が作業に対し徐々に慣れていったことが原因であると考えられる。

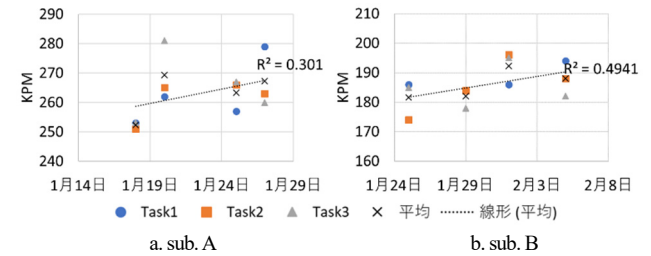


Fig.5 KPM x Day (Experiment ①)

4. 実験② (CO₂濃度 5 分急上昇) 概要

4.1 実験条件

実験①で知見された結果を考慮して、慣れの影響を限りなく排除し濃度負荷を大きくする等の改善をした実験②を実施した。

実験②は 2021 年 3~12 月に同実験室で行い、被験者は健康な男子大学生 7 名 (2、3 サイクル目は 5 名) である。

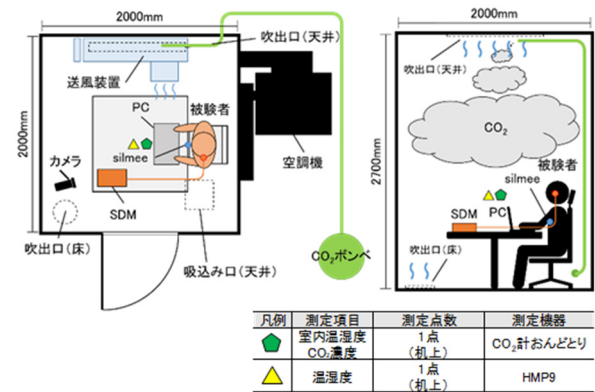


Fig.6 Laboratory (Experiment ②)

4.2 実験ケース

実験ケースを Table.5 に示す。また、CO₂濃度の変化のイメージを Fig.7 に示す。実験①では 30 分間かけ緩やかに上昇させていったが、CO₂濃度による負荷を増やすため、実験②では 5 分間で急上昇させた。また、実験②では同様の実験を同一被験者で計 3 サイクル実施した。1 サイ

クル目は600ppmと3500ppmまたは5000ppmの2ケースを実施し、2、3サイクル目はTable.5の通り計4ケースで実験を行った。

Table.5 Experimental case (Experiment ②)

	CO ₂ 濃度	温度	相対湿度	着衣量	状態
case2-1	600ppm	25°C	50%RH	0.8clo	椅座
case2-2	1500ppm				
case2-3	3500ppm				
case2-4	5000ppm				

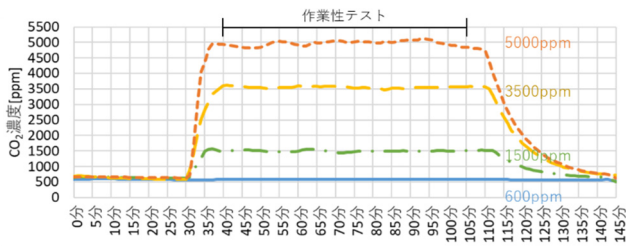


Fig.7 CO₂ concentration (Experiment ②)

4.3 作業性テスト

生産性を測るための作業性テストとして、実験②では作業負荷を増やすため、60分間のタイピングと5分間の100マス計算を実施した。なお、テストの慣れを防ぐため、初回の実験前に計3回の作業テストを行ってもらい、実験前にも5分間タイピングの練習を実施した。

4.4 測定項目

生理量の測定項目をTable.6に示す。実験②では、SDMに加え、生体センサを用いて生理量を実測した。主観申告は実験①の内容にリフレッシュ感を追加し、4回目の主観申告時に回答してもらった。

Table.6 Measurement item (Experiment ②)

機器名	測定項目	測定部位
SDM (経皮的血液ガスモニタリング)	表2と同様	耳たぶ
silmee (生体センサ)	心拍数	胸部
	R-R間隔	
	呼吸間隔	
	体動	
手動式血圧計 HEM-6324T	表2と同様	上腕

Table.7 Questionnaire items (Experiment ②)

カテゴリー	内容	評価方法
環境的項目	表3と同様	表3と同様
	ストレス	7段階評価
心理的項目	集中度 ※3回目のみ	7段階評価
	リフレッシュ感 ※3回目のみ	7段階評価

4.5 実験手順

実験手順はFig.8の通りであり、計4回の主観申告と60分間のタイピング、5分間の100マス計算を実施した。

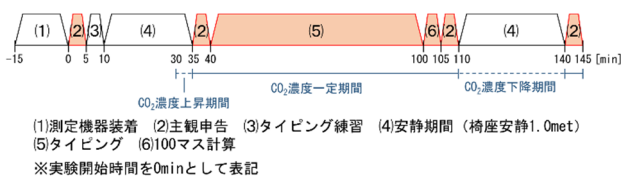


Fig.8 Time schedule (Experiment ②)

5. 実験② (CO₂濃度5分急上昇) 結果

5.1 作業性テスト結果

全3サイクルのタイピングのミス率を回数毎に並べたものをFig.9に示す。なお、a. 低CO₂濃度は600ppmの結果、b. 高CO₂濃度の被験者A、Cは3500ppm、被験者D、E、Gは5000ppmの結果である。被験者D以外においては回数を重ねる毎にミス率が減少するというような現象は見られないことから、慣れの影響を少なくすることができていると考えられる。同様に100マス計算においても被験者E以外では慣れの影響は見られなかった。

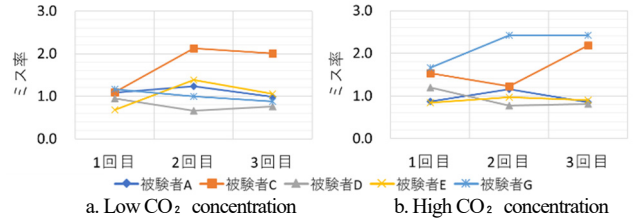


Fig.9 Error rate × Day (Experiment ②)

全3サイクルのタイピングのミス率(総ミス数/総ワード数)の平均値と100マス計算のミス率(ミス数/総回答数)の平均値をFig.10に示す。タイピングにおいては、600ppmに対し3500ppmで約10%、5000ppmでは約17%ミス率が増加しており、CO₂濃度が上昇することによりミス率が増加する傾向が確認された。100マス計算では、1500ppmから5000ppmにかけCO₂濃度が上昇することにより、ミス率が増加する傾向が確認された。

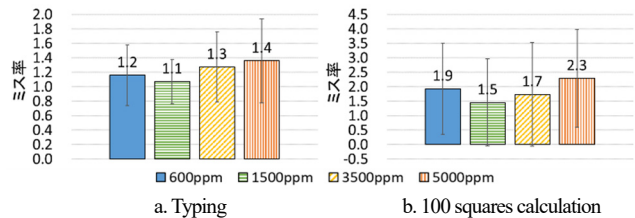


Fig.10 Error rate of workability test (Experiment ②)

5.2 心理量結果

主観申告の結果をFig.11に示す。600ppmに対し5000ppmで約11%集中度が低下し、高CO₂濃度において集中度が低下する傾向が確認された。その他の主観申告に関しては、CO₂濃度による差異は確認できなかった。

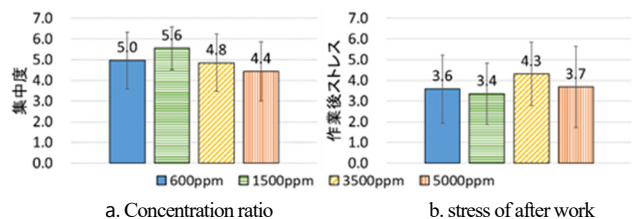


Fig.11 Questionnaire results (Experiment ②)

また、ねむけ感の結果をFig.12に示す。これは全サイクルの結果の平均値である。被験者毎による差は大きいですが、濃度上昇直後の2回目では5000ppmで、作業性テスト後の3回目では3500ppmでねむけ感が最も大きくなった。したがって、わずかではあるが高濃度においてねむ

け感が大きくなることが確認できた。

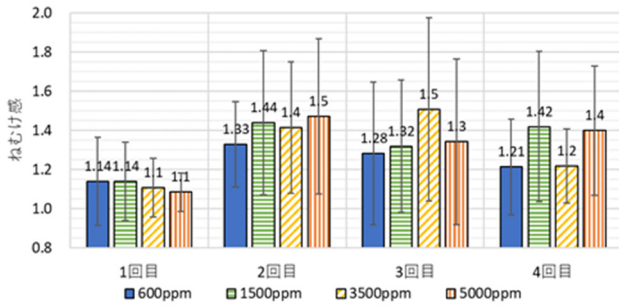


Fig.12 Sleepiness results (Experiment ②)

5.3 生理量結果

生理量として実験中PCO₂を測定したが、CO₂濃度とPCO₂の結果に関係性は見られなかった。仮に外気のCO₂濃度が5000ppmの場合、吸気中のCO₂分圧は3.8mmHgとなる。それに対して肺胞内の全圧は760mmHg、酸素分圧は約100mmHgと言われており、肺胞内のガス交換に関わる分圧に対し、吸気中のCO₂分圧は小さい値であるため、本実験のCO₂濃度では直接的なPCO₂への影響は少ない可能性が考えられる。一方、被験者Cにおいては全ケースにおいて一時的にPCO₂が下降する現象が見られた。実験中撮影していた動画を確認すると、PCO₂が下降したタイミングで被験者が深呼吸または欠伸をしており、それがPCO₂に影響したものと考えられる。

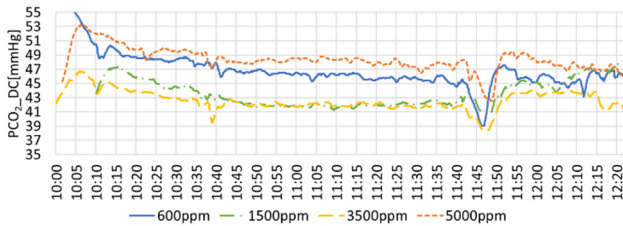


Fig.13 PCO₂ (sub. C)

また、全ての実験においてPRの上昇に伴いPCO₂が低下する挙動が確認できた。この現象は2019年度に実施した既往研究⁴⁾においても同様の傾向が確認できている。PRが高くなることにより血流がよくなり、血中CO₂濃度の低い新鮮な血液が流れてきたと考えられる。

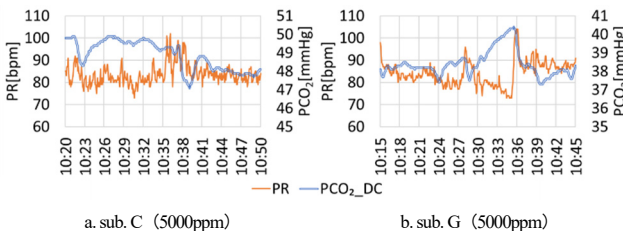


Fig.14 PR × PCO₂

また、全ての被験者において濃度上昇後の主観申告を行うタイミングでPRが上昇する傾向が見られた。しかし、低濃度においても同じような挙動が示されたため、CO₂濃度の影響よりも、リラックス状態からアンケートや作業性テストという緊張状態に移行したことが原因であると

考えられる。

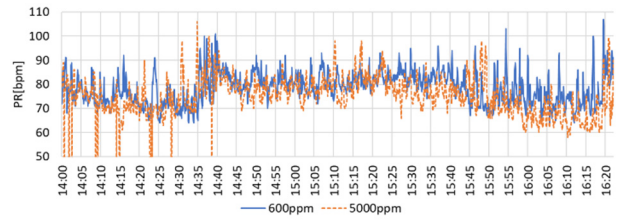


Fig.15 PR (sub. E)

6. まとめ

CO₂濃度を30分間で上昇させた実験①と、CO₂濃度を5分間で急上昇させた実験②を行い、結果は以下のようになった。

- 1) CO₂濃度が高くなると、タイピング、100マス計算の両方でミス率が大きくなる傾向が示された。タイピングにおいては、600ppmに対し5000ppmで約17%ミス率が増加した。
- 2) CO₂濃度が高くなると、集中度が低下する傾向が示された。600ppmに対し5000ppmにおいては約11%集中度が低下した。
- 3) 個人差はあるが、高CO₂濃度においてねむけがわずかに大きくなることが確認できた。
- 4) PRがPCO₂に影響を与えることが示唆された。

注釈

- 1) 調査票は日本産業衛生学会産業疲労研究会による。各25項目の質問を5つの群(I群:ねむけ感、II群:不安感、III群:不快感、IV群:だるさ感、V群:ぼやけ感)に分別しそれぞれを平均することにより、疲労状況を評価することができる。

参考文献

- 1) U. Satish, et al. “Is CO₂ an Indoor Pollutant? Direct Effects of Low-to- Moderate CO₂ Concentrations on Human Decision- Making Performance”, Environ Health Perspect (2012)
- 2) J. G. Allen et al. “Associations of Cognitive Function Scores with Carbon Dioxide, Ventilation, and Volatile Organic Compound Exposures in Office Workers: A Controlled Exposure Study of Green and Conventional Office Environments”, Environmental Health Perspectives, 124-7 (2016)
- 3) Tomoyuki CHIKAMOTO, Ryouto MIMURA, “Influence of Carbon Dioxide Fluctuation and Thermal Environment on Workability”, Physiology and Psychology, CLIMA 2019
- 4) 坂井遥祐ほか、「ヒューマンファクターを組み込んだ空調システム・制御システムの構築 (その19) 室内のCO₂濃度が血中CO₂濃度と他の生理量に及ぼす影響」、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、第3巻、pp.101-104、(2020)

診察室における感染予防対策としての局所換気システムの性能評価に関する研究 その2 対面者からの飛沫核暴露による在室者の感染リスクに関する検討

Performance of Local Exhaust System as Prevention Measure of Infection in Consulting Room - Part 2 Estimation of Infection Risk due to Exposure to Droplet Nuclei from Infected Person in front

○吉原 隼 (大阪大学) 山中 俊夫 (大阪大学) 小林 知広 (大阪大学)

崔 ナレ (大阪大学) 小林 典彰 (大阪大学) 張 韌 (大阪大学)

Jun YOSHIHARA*¹ Toshio YAMANAKA*¹ Tomohiro KOBAYASHI*¹

Narae CHOI*¹ Noriaki KOBAYASHI*¹ Ren ZHANG*¹

*¹Osaka University

In this paper, a local exhaust system is introduced into the consultation room to explore more effective ventilation measures in order to prevent infection. This study plans to carry out the experiment in a full-scale model. CFD steady state analysis was used to figure out the capture efficiency of the hood and estimate the infection risk due to exposure to droplet nuclei from infected person in front. In addition, contribution rate of the hood is estimated using SVE 5, which is known as one of the ventilation efficiency indices.

はじめに

2019年秋より感染が確認された新型コロナウイルス感染症 (Coronavirus disease 2019: COVID19) は、さまざまに変化を遂げながら2022年に入っても収束したとは言えない状況が続いている。その感染経路の一つとして、空中を漂う飛沫核による空気感染が挙げられる。本研究は咳や会話によって排出された飛沫核に対し、局所排気装置 (フード) を用いて除去するという着想に基づき、フードの感染予防対策としての性能把握を目的としている。本報では空間として感染者と接触する可能性の高い診察室を、状況として患者と医者が対面し着席して会話をすることを想定した。また患者の口から発生した飛沫核を空気と同じ密度を持つ仮想のトレーサーガスを用いて再現し、数値流体力学 (Computational Fluid Dynamics : 以下 CFD) を用いた定常解析において、フードの排気量、高さ、位置及び室換気回数をパラメータとして変化させ、それぞれのケースについて、患者の口から発生したトレーサーガスに対するフードの捕集率を算定した。また換気効率指標として知られる SVE 5¹⁾ (Scale of Ventilation Efficiencies 5) を

用いてフードの寄与率分布を明らかにした。さらに患者の15分間在室時の感染リスク及び感染リスクが5%に達するまでの時間の算定を行なった結果を報告する。

1. CFD 定常解析概要

1.1 解析空間

本研究は Fig.1 に示す実寸大模倣実験を予定しており、室内に HEPA フィルターを通して浄化した空気を給気することで、クリーンルームとして機能するチャンバーを構築した。Fig.1 において赤線で示したチャンバー内だけを解析空間とする。給気方法は室内の流れ場に与える影響を最小するため、全面床染み出し空調を採用した。また Fig.1 に示す実験装置の都合上、予定している実寸大模型実験では床面給気量が 1,000 m³/h で固定されることになる。この場合、室換気回数は 49.85 回/h と非常に大きくなる。空間の主要な寸法は Fig.2 に示すように、2.4 × 3.8 × 2.2 (= 20.064 m³) の空間で、患者と医者が対面し 1,200 mm の距離を開けて着席して会話をすることを想定する。患者の頭上に局所排気装置 (フード) を導入し、流量バランスを取るための一般的な排気

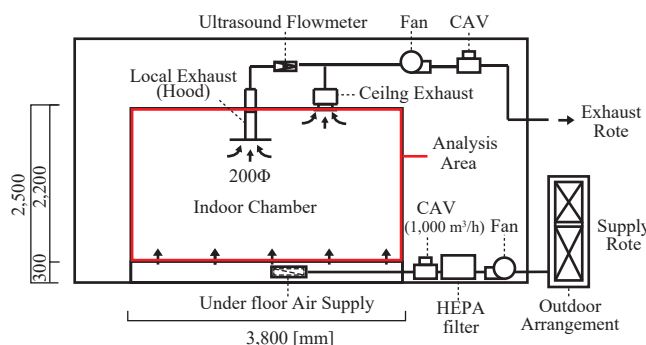


Fig. 1 Cross section of full scale experiment

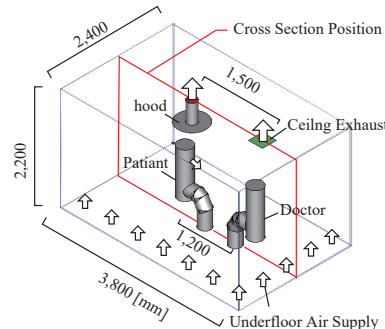


Fig. 2 Analytical model

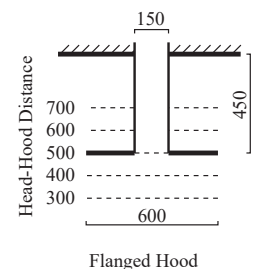


Fig. 3 Details of hood

口をフードと中心間距離 1,500 mm の位置に設置した。フードの形状は既往研究²⁾において捕集性能の高かった Flanged 型を採用した (Fig.3)。

1.2 CFD 解析条件及び境界条件

主な解析手法を Table 1 に示す。患者が新型コロナウイルス感染症に感染していると仮定し、会話により患者の口から発生した飛沫核を、気流と共に挙動するものとして、空気と同じ密度を持つ仮想のトレーサーガスを用いて再現する。なお発生条件は前報³⁾に記載する発話時の呼気風速及び呼吸量の測定実験により得られた風速 0.299 m/s、角度 11.9° (鉛直下向き)、呼吸量 5.21 L/min (口の大きさ 17.04 mm × 17.04 mm) を使用する。そのため本解析ではマスクをしなくて会話をすると仮定する。境界条件を Table 2 に示す。トレーサーガス発生濃度は換気回数に基づく基準化濃度とし、式(1)において完全混合時の濃度が 1 となるように、換気量ごとにトレーサーガス発生濃度 (C_{tg}) を変化させている。トレーサーガス濃度図 (Fig.5) において濃度を相対的に比べることが狙いである。

$$C_p = \frac{M \times C_{tg}}{Q} = 1 \quad (1)$$

C_p : 完全混合時の室内濃度 [-] C_{tg} : トレーサーガス発生濃度 [-]
M : トレーサーガス発生流量 [m³/h] Q : 換気量 [m³/h]

また発熱は人体からのみとし一体 75 W × 2 人とした。人体モデルは実験で使用予定の模擬人体を再現した。また乱流エネルギー:k及び乱流消失率:εを Table 3 に示す。

1.3 解析パラメータ

フードの捕集率への影響及び感染リスクへの影響を比較するためにフード排気量、フード - 頭上間距離、フード水平位置及び室換気回数をパラメータとして変化させた。パラメータ表を Table 4 に示す。目的ごとにパラメータを Case A, B, C, D の 4 種類に分類した。Case A は予定している実験の予備解析および実験パラメータの検討として、換気回数を 49.85 回/h (床面給気量: 1,000 m³/h) に固定し、フード排気量、フード - 頭上間距離、フード水平位置を Table 4 の通りに変化させた。Case B では換気回数の影響を見るためにフードの排気量、フード頭上

Table 1 Analysis Condition

Analysis Condition	
CFD Code	STREAM ver.2021
Analysis Volume	2.4 (x) × 3.8 (y) × 2.2 (z)
Total Number of Mesh	2,444,148
Turbulence Model	Standard k-ε model
Algorithm	SIMPLE
Discretization Scheme	QUICK
Number of Cycles	3,000

Table 2 Boundary Condition

Boundary Condition			
Wall	Wall Boundary	no-slip	
	First Mesh from Wall	100 mm wide	
	Converctive heat transfer rate	Ceiling	0.957 W/(m ² K)
		Wall	3.048 W/(m ² K)
		Floor	4.018 W/(m ² K)
Temperature	20 °C		
Emissivity	0.9 [-]		
Inflow Boundary*	k = 3/2(U · I) ² ε = (Cμ ^{3/4} · k ^{1/2})/ L		
Human Heat Generation	75W × 2 person		
Emission	Contaminant	Tracer gas	
	Diffusivity	0.00167 (CO ₂)	
	Temperature	32 °C	
	Concentration	Nomalization by Ventilation Volume	
	Flow Rate	5.21 L/min	
	Velocity	0,299 m/s	
	Angle	-11.9°	
	Mouth Size	17.04 × 17.04 mm	
Initial Air Temperature	20 °C		
Supply Air Temperature	20 °C		

* I : Turbulence intensity Cμ: Turbulence model constant
U: Mean flow velocity [m/s] L : Turbulent length scale [m]

Table 3 Turbulence Condition

	I [-]	Cμ [-]	L [m]	Q [m3/h]	k [m2/s2]	ε [m2/s3]
mouth	0.1	0.09	0.0017	0.313	1.34E-03	4.74E-03
				120.1	2.01E-09	1.48E-12
floor	0.01	0.09	0.01	240.5	8.05E-09	1.19E-11
				401.0	2.24E-08	5.50E-11
				601.6	5.04E-08	1.86E-10
				802.2	8.96E-08	4.40E-10
				1000	1.39E-07	8.53E-10

Table 4 Details of Each Parameter

	Parameter	Air Change Rate [1/h] (Flow Rate [m ³ /h])	Hood Flow Rate [m ³ /h]	Hood-Head Distance [mm]	Hood Horizontal Position [mm]
Case A	Reference Condition	49.85 (1,000)	100	500	0
	Hood Flow Rate	49.85 (1,000)	50, 150, 200, 250, 300	500	0
	Hood-Head Distance		100	300, 400, 600, 700	
	Hood Horizontal Position		500	-300,-200,-100,100,200,300	
Case B	Air Change Rate	49.9, 40. 30, 20, 12 ,6	100	500	0
Case C	Reference Condition	6 (120.1)	100	500	0
	Hood Flow Rate	6 (120.1)	50, 150, 200, 250, 300	500	0
	Hood-Head Distance		100	300,400,600,700	
	Hood Horizontal Position		500	-300,-200,-100,100,200,300	
Case D	Air Change Rate	49.9, 40. 30, 20, 12 ,6	0	500	0

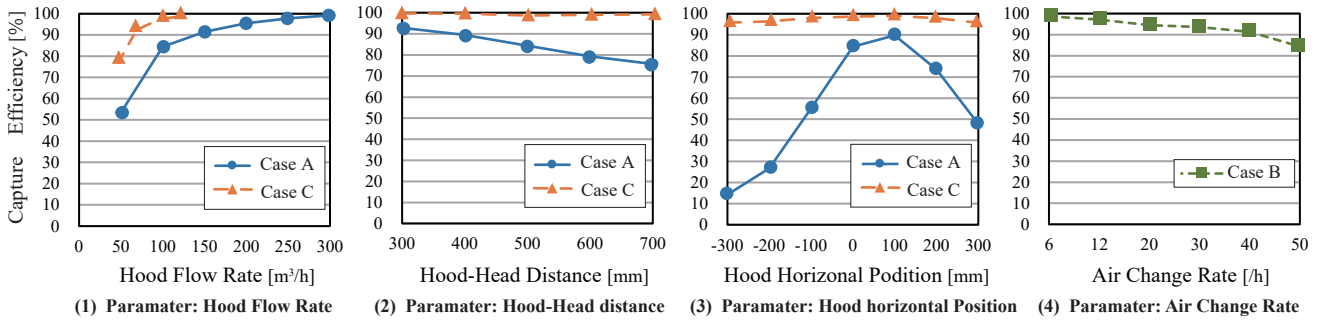


Fig. 4 Estimation of capture efficiency in Case A, B, C

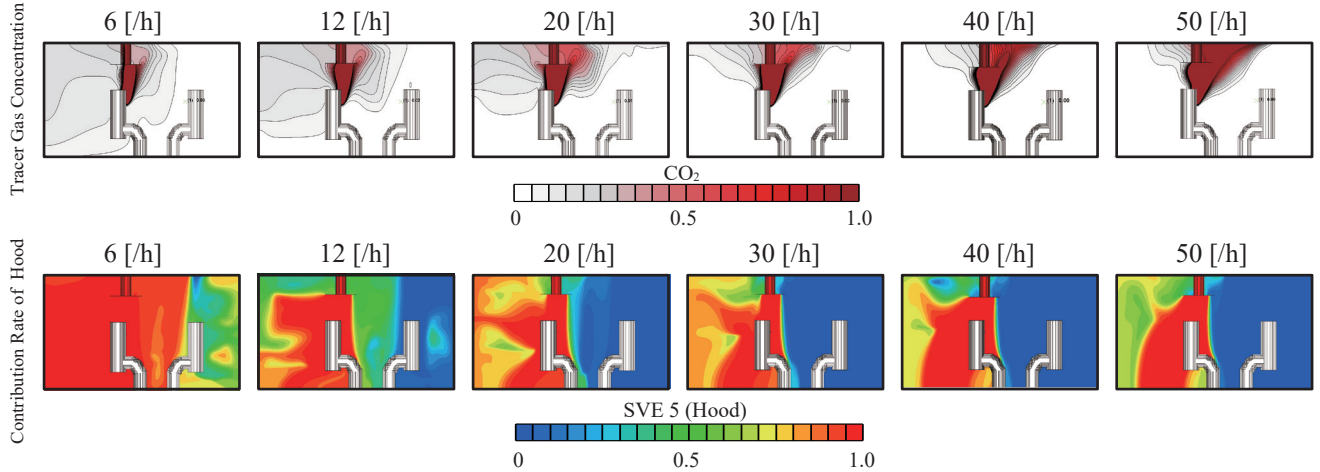


Fig.5 Distribution of tracer gas Concentration and Contribution Rate of Hood in Case B

間距離、フード水平位置を固定し、床面給気量を変化させることにより、換気回数を REHVA⁴⁾の推奨している 6-12 回/h を参考に Table 4 の通りに変化させた。Case C ではより一般的な環境下で検討を行うために換気回数 6 回/h (床面給気量: 120.4 m³/h) に固定し、フード排気量、フード-頭上間距離、フード水平位置を Table 4 の通りに変化させた。Case D はフードを導入せずに、換気回数を Table 4 の通りに変化させた。Case B (フード 100 m³/h) と比較することで、感染リスクの低減をフードの有無で比較することが狙いである。Case A, B, C (37 条件) において捕集率を、Case A, B, C, D (41 条件) において医師の感染リスクを算定した。なお解析サイクル数は、Case A の基準条件 (Table 4) にて 10,000 回、5,000 回、3,000 回とした定常解析を行い、全ての解析で 10⁴ 以下の収束を確認できたため、サイクル数は 3,000 回とした。

2. 捕集率の算定及び SVE 5 を用いた比較

2.1 捕集率の算定式

患者の口から発生させたトレーサーガスに対するフードの捕集率を式 (2) を用いて算定した。

$$\eta = \frac{Q_h C_h}{Q_h C_h + Q_e C_e} \quad (2)$$

η : フード捕集率 [-] C_h : フードのトレーサーガス排気濃度 [-]
 Q_h : フード排気量 [m³/h] C_e : 一般排気口のトレーサーガス排気濃度 [-]
 Q_e : 一般排気口排気量 [m³/h]

2.2 換気効率指標: SVE 5

換気効率指標として知られる SVE 5¹⁾ を用いて、空間の任意の点におけるフードの寄与率分布を求めた。SVE 5 は式 (3) により与えられる。

$$SVE 5(x) = \frac{C'(x, n)}{C_0(n)} \quad (3)$$

n : 吸い込み口番号
 $C'(x, n)$: 初期条件として室内清浄かつ n 番吸い込み口濃度 $C_0(n)$ の条件下で温度輸送方程式を逆時間方向に解いて得られる位置 x での濃度
 $C_0(n)$: n 番吹き出し口 (吹き出し風量 $Q(n)$ [m³/s]) から q [m³/s] のトレーサーガスの発生があるときの吹き出し気流濃度 ($C_0(n) = q/Q(n)$)

SVE 5 の算出は STREAM.ver2021 の機能を用いた。

2.3 捕集率の算定結果と考察

Case A, B, C の捕集率の算定結果を Fig.4 に示す。Case A と Case C を比較すると、すべての条件で捕集率は Case C が上回った。これはフードと一般排気口の流量比が小さくなったためだと考えられる。Case A ではフードの水平位置が捕集率に最も影響を与えた。これは換気回数: 49.8 回/h (総給気量 1,000 m³/h) という大きな流量が、室全体に強い上向きの気流場を作った影響だと考えられる。Case C ではフードの排気量が捕集率に最も影響を与えた。これによりフードの捕集域に影響を与えるような大きな気流がない場合は、フードの排気量が捕集率に最も影響することが分かった。

2.4 トレーサーガス濃度分布図と SVE 5 の比較と考察

Case B におけるトレーサーガス濃度分布図及び SVE 5 によるフードの寄与率を Fig.5 に示す。SVE 5 では 1 に近いほど、その点のトレーサーガスがフードから排

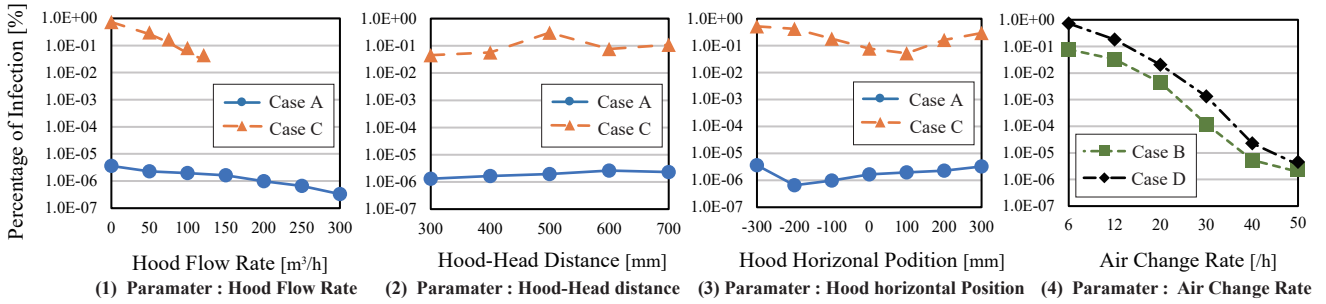


Fig. 6 Estimation of infection risk of doctor in Case A, B, C, D

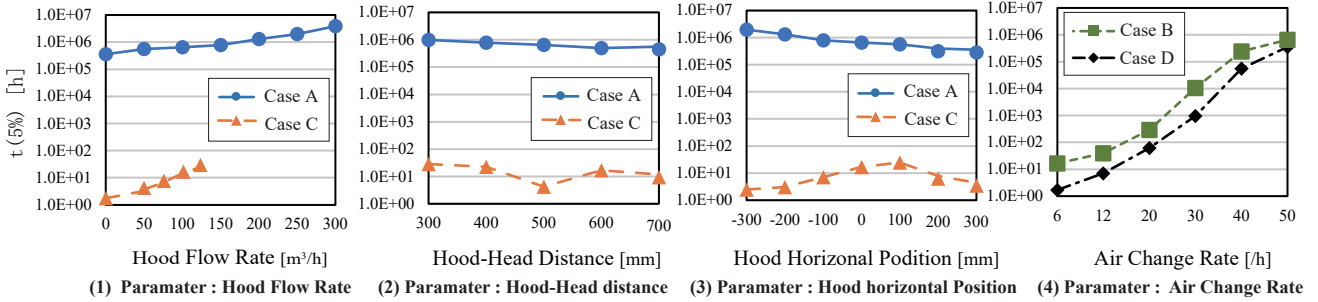


Fig. 7 Estimation of time for infection risk reach to 5% in Case A, B, C, D

出されていることが分かる。Fig.5(Case B) ではフードの排気量は 100 m³/h であり、換気回数が大きくなるに従い、一般排気口の流量も大きくなり、その結果フードの勢力範囲に大きな影響を与えたことが分かった。

3. 感染リスクの算定

3.1 感染リスク評価手法

感染リスク評価には Welles&Riley Model を用いた。Welles&Riley Model の基本式は式 (4) で与えられる。

$$P = \frac{C}{S_0} = \frac{S_0 - S}{S_0} = 1 - e^{-n} \quad (4)$$

P : 閉鎖空間における新規感染者の増加率
C : 新規感染者数
S : (susceptibles) ある空間に一定時間入室後に感染可能性を有する人の数
S₀ : (susceptibles) 感染可能性を有する人の数の初期値
n : 感染リスクの評価単位 [quanta]

本研究では REHVA⁴⁾ の算出した軽度の運動、会話時の quanta 生成量 42 quanta/h を用いた。また解析結果から医者 の口前濃度と患者の口からのトレーサーガス発生濃度比を取ることで感染リスクを算定した。また一回の診察時間を考慮して、在室時間は 15 分と仮定した。また感染リスクの評価基準として REHVA⁴⁾ が用いた 5% という値を基準に、感染リスクが 5% に達するまでの時間 : t(5%) も算出した。

3.2 感染リスクの算定結果と考察

Case A~D の感染リスク :P を Fig.6 に、感染リスクが 5% に達するまでの時間 : t(5%) の算定結果を Fig.7 に示す。結果を比較すると Case A において、全体的に P = 約 10⁻⁶ %、t(5%) = 約 10⁶ h となり感染リスクは殆どないと言える。Case C では、フード水平位置 -300 mm における P = 0.52 %、t(5%) = 2.5 h で最大、最短となっ

た。またフードの有無を Case B, D で比較すると、どちらも換気回数が 6 回/h で、フード排気量 0 m³/h の Case D では P=0.73 %、t(5%)=1.7 h であったのに対し、フードを 100 m³/h 導入した Case B では P=0.08 %、t(5%)=16.7 h となった。t(5%) = 16.7 h は一般的な医師の勤務時間を考えると十分に長い時間だと言える。

おわりに

本報では、診察室で対面着席時に会話をする状況について CFD 定常解析を行い、フードの捕集率、寄与率及び医師の感染リスクの算定結果について報告した。結果から、フードのより純粋な捕集性能を見るためには、実験装置の 49.8 回/h という換気回数は、過大であることが分かった。また換気回数 6 回/h(1,000 m³/h) の場合、フードを 100 m³/h 導入することで、十分な感染症対策効果があることが確認された。今後は実寸大模型実験を行い、CFD 解析 (Case A) の精度検証及び咳発生に対するフードの捕集性能、感染リスク評価を行う予定である。

謝辞

なお、本研究は、科研費基盤研究 (B)21H01492、挑戦的研究 (萌芽)19K22011、及び令和 2 年度大阪大学医学部新型コロナウイルス対策研究開発助成を受けたものである。

参考文献

- 1) 小林、加藤、村上：不完全混合室内における換気効率・温熱環境 形成効率評価指標に関する研究、第 1 報 CFD に基づく局所領域の換気効率評価指標の開発、空調調和・衛生工学学会論文集 No. 6, pp29-36, 1998. 1
- 2) 小森、山中、小林智広、崔ナレ、小林典彰：横風気流下における局所排気装置の汚染物捕集性能に関する研究 (その 2) フード形状及び汚染源の発熱の有無が汚染物捕集性能に及ぼす影響、日本建築学会大会学術講演梗概集, pp1453-1454, 2021. 9
- 3) 張、山中、小林智広、崔ナレ、小林典彰：診察室における感染予防対策としての局所換気システムの性能評価に関する研究、(その 1) CFD 解析によるヒト由来飛沫核の拡散挙動と換気による除去性能の検討、空調調和・衛生工学学会近畿支部学術研究発表会論文集, 2022. 3, 掲載予定
- 4) REHVA : COVID-19 guidance document version4,2021

BIM と連携した配管性能検査手法の開発と報告

Development and Reporting of a Piping Performance Inspection Method Linked to BIM

○五十嵐 賢 (竹中工務店)

Satoru IGARASHI*1

*1 Takenaka Corporation

1. 序論

1.1 建設業の抱える課題

2019年4月1日から施行された「働き方改関連革法」により、罰則付きの時間外労働時間の上限(原則 月45時間・年間360時間)規制が設けられた(建設業は2024年4月1日以降から適用される)。

また(一社)日本建設業連合会は、高齢建設技能者の大量離職に備えて、新規建設技能者を確保するため、建設現場への週休二日制度の導入を進めており、2019年度末までに4週6閉所以上、2021年度末までに4週8閉所(週休二日)を目標に掲げている。

時間外労働の削減・4週8閉所など、労働時間が制限されていく一方で、求められる工期と品質は変わらないことから、「現場における生産性の向上」が急務の課題となっている。

1.2 課題の分析

当社西日本圏における新築工事物件(n=148件)にて、工種別の竣工までの労務工数を分析した結果を図1に示す。この結果より、電気・給排水・空調工事が労務工数の上位3位を占めていることが分かった。また工事内訳を分析したところ「協力会社の施工管理者」の労務工数が大きな割合を占めていることが分かった(表1)。

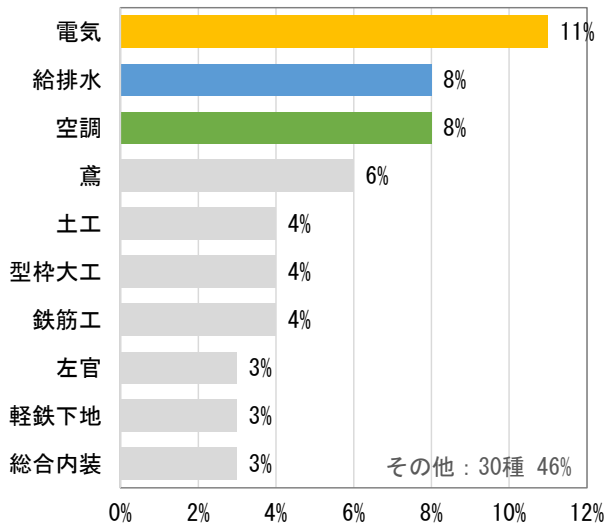


図1. 工種別 労務工数の割合

表1. 設備工事別 労務工数内訳

電気設備工事の内訳		給排水設備工事の内訳		空調設備工事の内訳	
電気	52%	配管工(給排水)	45%	施工管理	24%
施工管理	29%	施工管理	29%	ダクト工	21%
スリーブ・インサート	10%	消火配管工	9%	配管工(空調)	16%
弱電	5%	スリーブ・インサート	6%	冷媒配管工	9%
防災工	2%	その他専門工	3%	保温工(空調)	9%
施工図	1%	相判・雑工・塗装	2%	計装工	8%
相判・雑工・塗装	1%	その他	2%	スリーブ・インサート	5%

更なる調査として、図2に示す建物が竣工するまでの期間を、初期・中期・後期に分け、それぞれの時期にどの程度の業務量が生じているのかを分析したところ、工程中期から後期にかけての試運転・調整業務に多くの業務量が生じ、業務量のピークを迎えることが分かった。

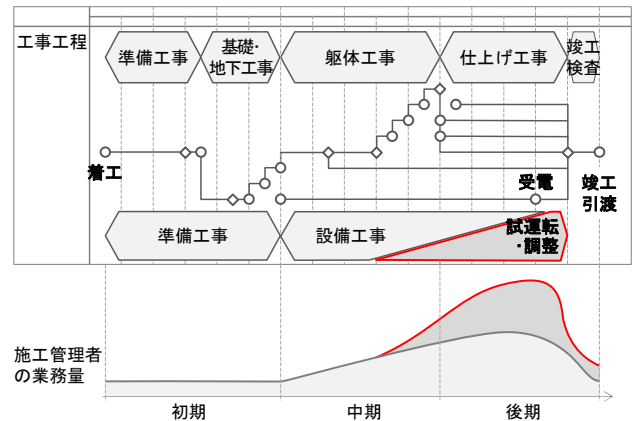


図2. 竣工までの工程表と業務量

試運転・調整業務とは、設計図書に記載の要求性能を満足していることを確かめ、それを記録する業務であり、具体的には電気設備の照度測定、空調工事の風量測定、空調・衛生工事の配管圧力試験・配管満水試験などがある。

実作業として日中、現地で測定・試験を行い、施工作业を終えた夕方以降に、事務所に戻り記録を作成するフローのため、時間外労働の大きな要因となっている。

以上より、設備協力会社を含む設備施工管理者の業務量と時間外労働の削減を目的に、業務量のピーク要因となる試運転・調整業務を省人化するシステムを開発した。

2. 本論

2.1 開発したシステムの概要

試運転・調整業務のうち照度測定と風量測定のための従来の作業フローと、開発した作業フローを図3に示す。

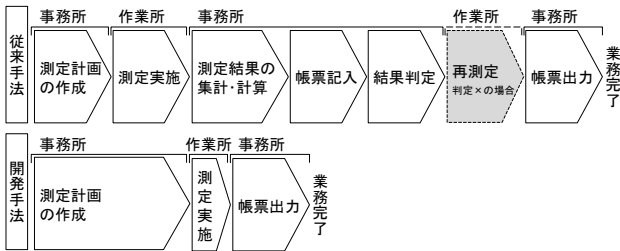


図3. 試運転・調整業務の作業フローと業務量

従来は現地で2人1組で測定し、事務所に戻り平均照度の計算や風速から風量を算出し、設計値と対比・判定し、記録に書き写し、その記録を印刷・バインドして一連の業務が完了する。

開発したシステムは、測定器とiPadをBluetooth通信で連携し、iPadアプリ(CheX・チェックロス)が測定値を読み、同時に判定と記録を自動で行うため、1人での測定が可能となる。測定実施の前に、iPadアプリで測定位置のプロットや判定基準(設計値)の入力などで作業量が増えるものの、現地測定が1人ででき、判定・記録も自動化されるため、照度測定や風量測定の場合は従来手法と比較して約半分の業務量で業務が完了できるようになった。

また開発したシステムに対応する測定・試験項目を表2に示す。今回の報告では、配管圧力・満水・満空試験を総称した配管性能検査がBIM(Building Information Modeling)と連携して行えるようになったことを報告する。

表2. 開発したシステムに対応する測定・試験項目

電気工事	照度測定, 絶縁抵抗測定, 接地抵抗測定
給排水工事	配管圧力試験, 配管満水試験, 配管満空試験
空調工事	風量測定, 配管圧力試験, 配管満水試験, 配管満空試験

2.2 BIMとは

従来の2次元CADでは、線とテキスト情報だけを保持していたのに対し、BIMでは3次元の図形情報と、寸法・材質・用途などの非図形情報を保持できるため、図4に示すように、単線では理解に時間を要するところが、BIMでは視覚的に容易に理解することができる。

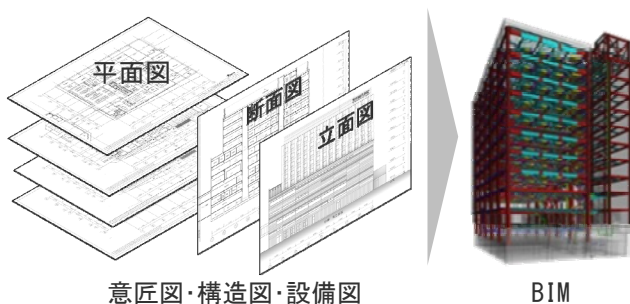


図4. 2次元図面とBIMの違い

2.3 配管性能検査とは

給排水・空調配管の配管性能とは、配管内を通す流体(液体・気体・気液混合)を配管システムの外に漏洩させないことと、給排水能力・給水圧力・給湯温度など、設計図書に記載の能力・仕様が確保できること、の2項目が配管性能として求められる。このうち配管システムの外に漏洩させないことを確認する試験と記録の作成を配管性能検査といい、工程の中期から後期にかけて実施する。

2.4 従来の配管性能検査手法と開発した検査手法

配管性能検査手法の作業フローを図5に示す。

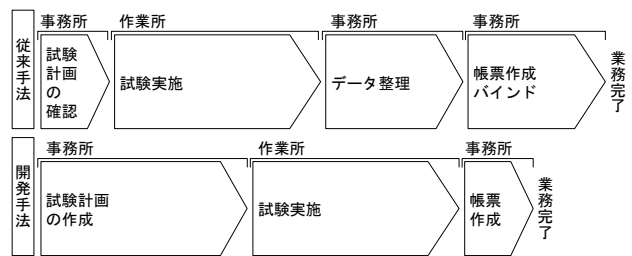


図5. 配管性能検査手法の作業フローと業務量

従来は事務所で試験用図面を用意し、試験範囲と試験条件(圧力・時間・判定基準)を確認する。

次に現地で試験範囲の配管に試験治具等や圧力ゲージを取り付け、現地の試験範囲と図面の試験範囲に齟齬が無いことを確認し、水や空気を充填する(配管圧力試験や配管満空試験の場合は圧力をかける)。そして圧力ゲージや水位変動が無いことを確認次第、試験開始の写真を撮影し試験を開始する(図6)。試験中は試験範囲の配管・継手等から漏洩がないことを確認し、圧力ゲージや水位に変化が無いことを確認する。所定の試験時間が経過した後、圧力ゲージや水位を確認し、判定基準を満たしている場合は、試験終了時の写真を撮影し試験の実施は完了する(判定基準を満たしていない場合は、漏水・漏気の疑いがあるため、原因箇所の調査・是正の後、再度試験を行う)。

最後に事務所に戻り、試験用図面に記載した試験範囲を記録用の図面に清書し、撮影した写真データを試験記録書に貼り付け、試験記録を作成する。そして試験記録が完成した後、紙で出力し、キングファイルにバインドして、1回の検査が完了する。

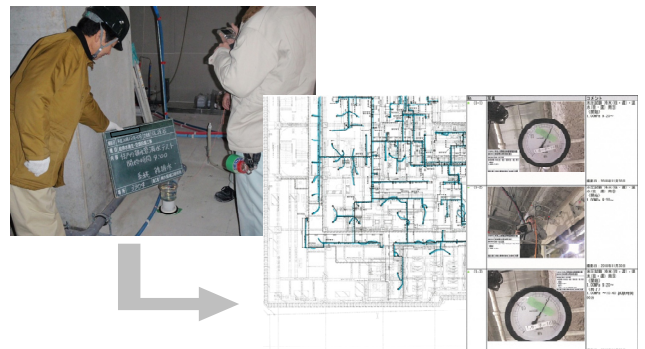


図6. 従来の配管性能検査

開発したシステムは、事務所でPCソフト(CheX)を用いて、BIM上で試験範囲と条件を試験系統毎に入力する。

次に現地では、従来の圧力ゲージではなく、圧力や水位変位量を記録するデジタル試験器(みるみるくん)を取り付け、試験範囲・試験条件と齟齬が無いことを確認してから試験を開始する(図7)。試験終了後、デジタル試験器から試験ログをiPadアプリ(CheX)にBluetooth通信で読み込み、判定基準を満たしていれば試験は完了となる。



図7. 開発したシステムを用いた配管性能検査

なお開発したシステムは、BIM上で試験範囲と条件を試験系統毎に入力する作業が新たに生じるため、この部分の業務量は増えるものの、事務所に戻ってからのデータ整理や帳票出力・バインドの作業が無くなることで、約1~2割の業務量削減となる。1回の検査あたりの業務量削減効果は小さいものの、配管性能検査は1つの建物で数十回~数百回行うため、その試験記録は膨大な量となり、従来手法では試験記録の管理にも非常に労力がかかっていた。これに対して開発したシステムでは、試験記録をデジタルデータで、BIMと連携して管理することができるため、試験記録の管理の簡易化と、検査進捗の見える化を実現し(図8)、検査の未実施を防ぐことができるようになった。

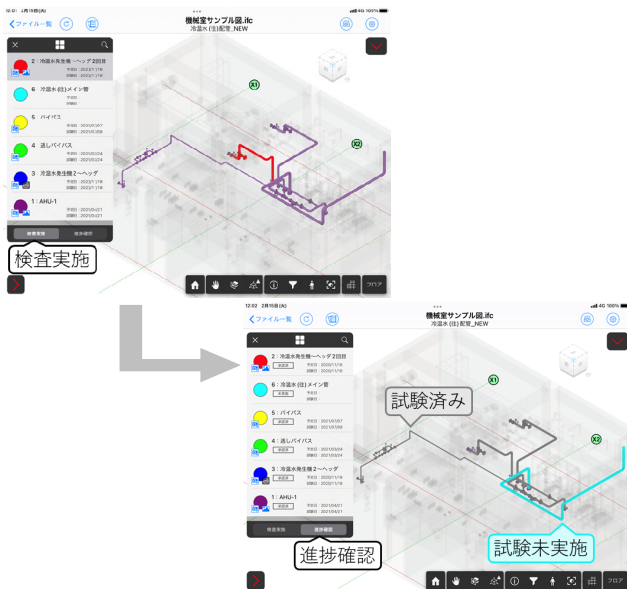


図8. 検査進捗の見える化

2.5 開発したシステムの適用方法

開発したシステムを適用するには、表3に示す用意が必要となる。

表3. 開発したシステムを適用するために必要なもの

BIM	配管施工図, IFCファイル
PC/iPad アプリ	CheX
デジタル試験器	みるみるくん

BIMはCADソフト T-fas・Rebro・Revit等で作図された配管施工図を*.ifcファイル*.rvtファイル形式で出力したもの。

CheX(チェックロス)は株式会社YSLソリューション社が開発・販売する図面閲覧・共有アプリ(有償アプリ・図9)。

みるみるくんはレッキス工業株式会社が開発・製造・販売する水圧・満水・空圧デジタル試験器(図10)。

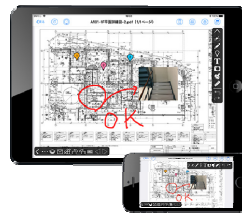


図9. CheX



図10. みるみるくん

3. 結論

iPadとデジタル試験器を連携し、BIMと紐づいた配管性能検査手法を開発した(図11)。これにより、工程中期から後期にかけての設備協力会社の施工管理者の業務量を削減すると同時に、検査記録をデジタルデータで一元的に管理することと、検査進捗を適切に把握することを実現した。

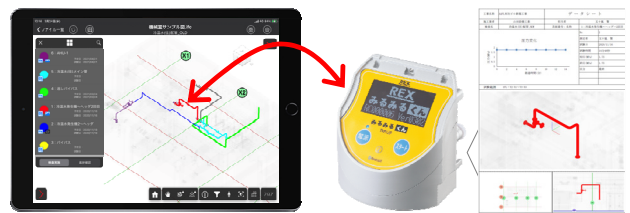


図11. 開発したシステムの概要

開発したシステムは汎用ソフト・機器を用いて再現が可能のため、2024年4月に向けて、多くの作業所へ定着・普及し、建設業の働き方改革の一助になればと考える。

読売テレビ新社屋の環境・設備計画
Environment and equipment planning for the new office building of
YOMIURI TELECASTING CORPORATION

株式会社竹中工務店設計部
TAKENAKA Corporation Design department
増田 恭大
Yasuhiro Masuda

キーワード：冷水2温度送水熱源システム(Heat source system with two-temperature cold water supply)、スタジオ空調システム(Air-conditioning system in a studio)、高性能ファサードシステム(High-performance facade system)、気流感変動制御システム(HVAC system with variable airflow feel)、BCP

1. はじめに

読売テレビ(YTV)は、日本テレビネットワークの在阪準キー局であり、60余年、様々な番組を日本全国に配信してきた。本建物は、読売テレビの新社屋であり、大阪城公園の広大な緑に面する大阪京橋 OBP 地区南街区に建設され2019年1月に竣工し、同年9月より放送を開始した。計画全体として、「関西から世界へ情報を発信する」をコンセプトに、賑わいにあふれ、市民に開かれ、社員が生き生きと働く、いわば“広場”としてのテレビ局を目指して計画された。

放送施設は、その特有の室用途によるエネルギー消費特性と非常時における放送機能の継続性が課題としてある。また、価値ある情報と創造性豊かなコンテンツの発信が求められている。本建物では、これらの課題に対して、読売テレビの社内アンケートを元に決定した「10seeds～あふれるビジョン～」により10のテーマ(10seeds)が掲げられた(図1-1)。この10seedsを設計コンセプトに展開している。環境・設備計画は、「環境対応性能」、「ファインアメニティ」、「スーパークリエイティブ工房」、「強靱な社屋」を基本コンセプトとし、展開している。「環境対応性能」に対しては、放送施設特有のエネルギー消費特性を解決する放送機能の特性に適した省エネルギー技術の採用、「ファインアメニティ」と「スーパークリエイティブ工房」に対しては、魅力あるコンテンツの発信を支えるスマートウェルネスに配慮したオフィス環境の実現、「強靱な社屋」に対しては、非常時・災害時にも放送機能を継続・維持可能とするレジリエント建築を計画し、その実現に取り組んでいる。



図 1-1 コンセプト

2. 計画概要

2-1. 建築概要

本建物は低層部と高層部から構成されている。低層部は OBP 街区と川がもつ2つの軸に合わせて最大平面を確保し、高層部は街区から45度振れた軸上に配して大阪城と正対させている。全体をまち・川・城の3つの軸線による構成とし、軸線切替部に多様な庭園を設けることで、広大な大阪城公園とつながる緑あふれるテレビ局としている。また、大規模災害時にも放送継続を可能とするBCP要件から、免震構造を採用している。大規模平面形状の低層部の上にスレンダーな高層部が乗る構成のため、足元で免震構造とした上に、切替部である8・9階に中間層集中制振層を組んだ免

制振ハイブリッド構造を採用している。これにより、低層部から高層部まで大地震時の揺れを小さくし、再現期間500年の大地震に対して軽微な被害に留まる設計としている。

2 - 2 . 設備概要

放送施設は、その特有の室用途によるエネルギー消費特性と非常時における放送機能の継続性などの課題がある。また、近畿広域圏を対象としたテレビジョン放送事業を行っている特定地上基幹放送事業者であり、日本テレビネットワークの準キー局として、関西から全国に価値ある情報と創造性豊かなコンテンツを発信し続ける基盤を持つことが求められている。これらの特性・課題を踏まえて、環境・設備計画は、「関西から世界へ」情報を発信する次世代放送施設の創出を目指し、放送施設としての事業継続性、エネルギー消費特性を踏まえた省エネルギー性・環境性、魅力あるコンテンツ作成に寄与する快適性・知的生産性の最適化を図っている。

具体的には、「放送機能の特性に適した省エネルギー技術」、「スマートウェルネスに配慮した普及性の高い省エネルギー技術」、「非常時のエネルギー自立と省エネルギー・省資源の実現」に取り組んでいる（図2-1）。

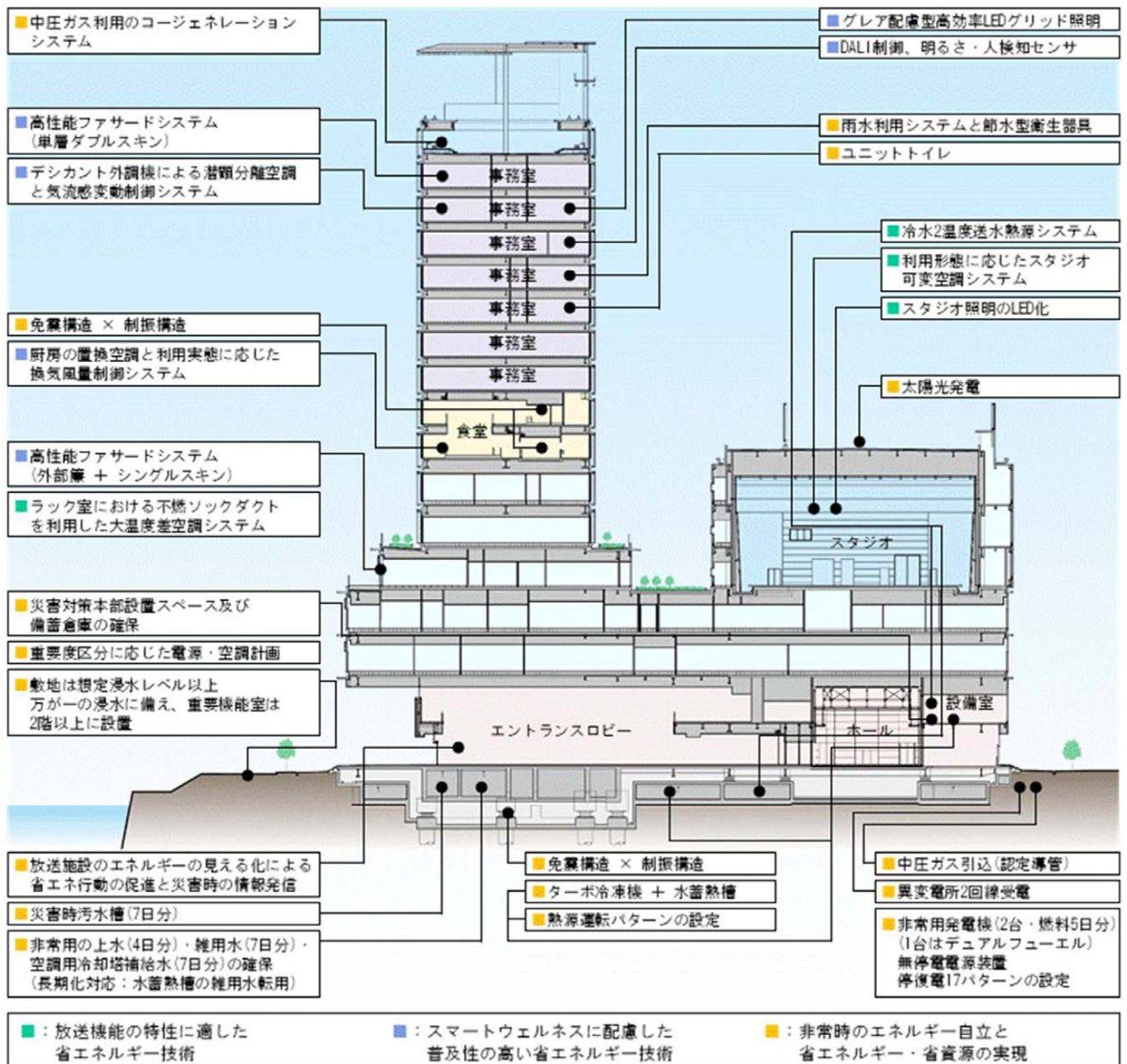


図 2-1 環境・設備計画の取り組み

3. 放送機能の特性に適した省エネルギー技術

3-1. 冷水2温度送水による熱源システム

放送施設は、スタジオ、副調整室、ラック室等の顕熱比の高い放送機能に必要な諸室が多くある一方で、一般的な諸室も多数存在している。本計画では、熱負荷用途に合わせて、冷水を2温度送水とすることで、熱源効率を高めたシステムを構築している。熱源システムフロー図を図3-1に示す。スタジオ、副調整室、ラック室等で高発熱の放送機器を多く設置している高顕熱負荷室は重要系統として中温冷水(10℃)とし、その他の一般諸室は一般系統として一般冷水(7℃)とした2温度送水としている。中温冷水の適用により、熱源機器単体のCOP向上、フリークーリング適用期間の延長や蓄熱効率向上により、熱源効率の向上を図っている。中温熱源はターボ冷凍機、温度成層型水蓄熱槽、空冷モジュールチラーで構成している。一般熱源は排熱投入型ガス吸収式冷温水機と空冷モジュールチラーで構成している。排熱投入型ガス吸収式冷温水機はコージェネレーションシステムの排熱を利用することで高効率運転を可能にしている。温度成層型水蓄熱槽は、潜り堰を介した多層連結方式とし、夜間にターボ冷凍機にて冷水7℃で蓄熱し、昼間10℃で放熱することで、蓄熱時の効率も高めている。また、配管系統を中温冷水と一般冷水の2系統とすることで、放送機器の多い重要系統に対してバックアップを可能とし、最重要系統の空調運転継続に対応している。

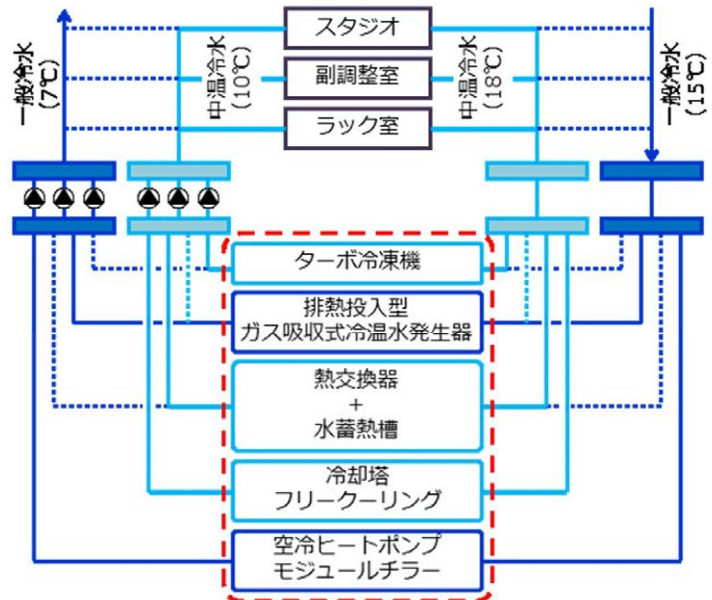


図3-1 冷水2温度送水による熱源システム

冷水2温度送水の検証結果として、2020年8月における7℃・10℃送水時のCOP実績値を図3-2に示す。ターボ冷凍機の7℃送水(蓄熱運転時)に比して10℃送水(昼間追掛け運転時)の場合は約28%の効率向上となっていることを確認している。

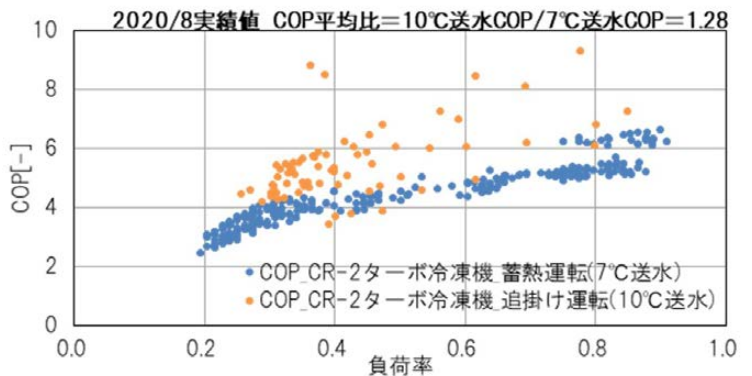


図3-2 冷水2温度送水COP実績値(2020年8月)

水蓄熱槽について、月別の蓄熱効率を図3-3に示す。蓄熱効率は、冷房期の8月で約90%、年間平均で約94%となっている。本蓄熱槽は、地階駐車場に設置しており、外気に面している部分が各槽2~3面あるため外気温の影響を受けやすいこと、7~12月中旬までは放熱運転をピークカットのために12時からにしているため、他月に比して蓄熱効率が低くなっている。放熱運転時間帯においては2次側に安定的に10℃送水ができていることを確認している。また、蓄熱運転から放熱運転にかけて温度成層が形成されていることを確認している。

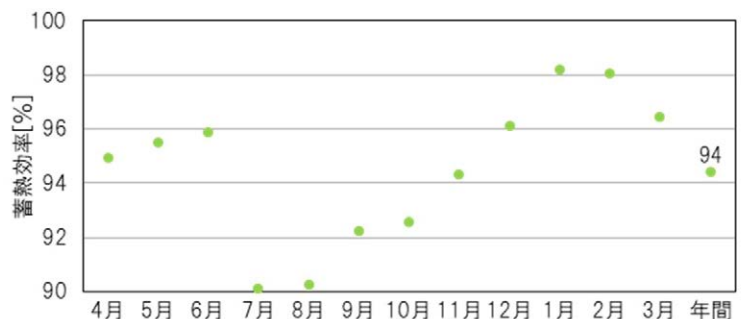


図3-3 月別蓄熱効率(2020年4月~2021年3月)

3 - 2 . 利用形態に応じたスタジオ可変空調システム

テレビスタジオは利用形態により大きく異なる空調負荷特性を有している。番組収録時は撮影用照明やその他機器から大きな発熱が発生する。一方で、セット設営・解体等の準備時の機器発熱は小さい。また、一般的にテレビスタジオは天井高 10m 前後の大空間であることが多く、変動する発熱を処理しながら居住域を効率的に空調する必要がある。

本建物は報道番組専用スタジオ 1 室、その他番組(バラエティ番組、情報番組等)収録用スタジオ 3 室の合計 4 室のスタジオを有している。代表 1 室のスタジオ全景写真を写真 3-1 に示す。天井高 14m のスタジオは撮影背景用の傾斜壁

(水平)を有し、下部は深さ 900mm のピットになっている。FL+11m の高さにグリッドパイプを有し、多くの吊物機器をその上に設置している。撮影用照明やセットを取り付ける吊ボタンは吊物機器により制御され、使用条件に応じて各吊ボタンの高さは任意に変更される。

本計画では、その他番組収録用スタジオの 3 室に対してスタジオ可変空調システムを導入している。空調システム概念図を図 3-4 に示す。(a)準備モードと(b)収録モードの 2 つの空調運転モードを有し、各ダクトのダンパーを開閉することでモード切替を行う計画としている。空調機は複数台の並列とし、空調負荷に応じて台数制御とファンのインバーター制御を行っている。

(a)準備モード

給気(SA)を居住域付近から行い、還気(RA)をピット部分から行うことで居住域のみを効率的に空調する計画としている。給気風量の上限は収録モード時の 25%としている。

(b)収録モード

多くの吊物機器があるため、給気(SA)・還気(RA)ともにスタジオ上部天井面からの吹出しが与条件であった。スタジオ上部に溜まった暖気を排気するとともに、到達距離の長いオート巡回流吹出口を使用し、居住域まで空調吹出空気を到達させる計画としている。



写真 3-1 スタジオ全景写真

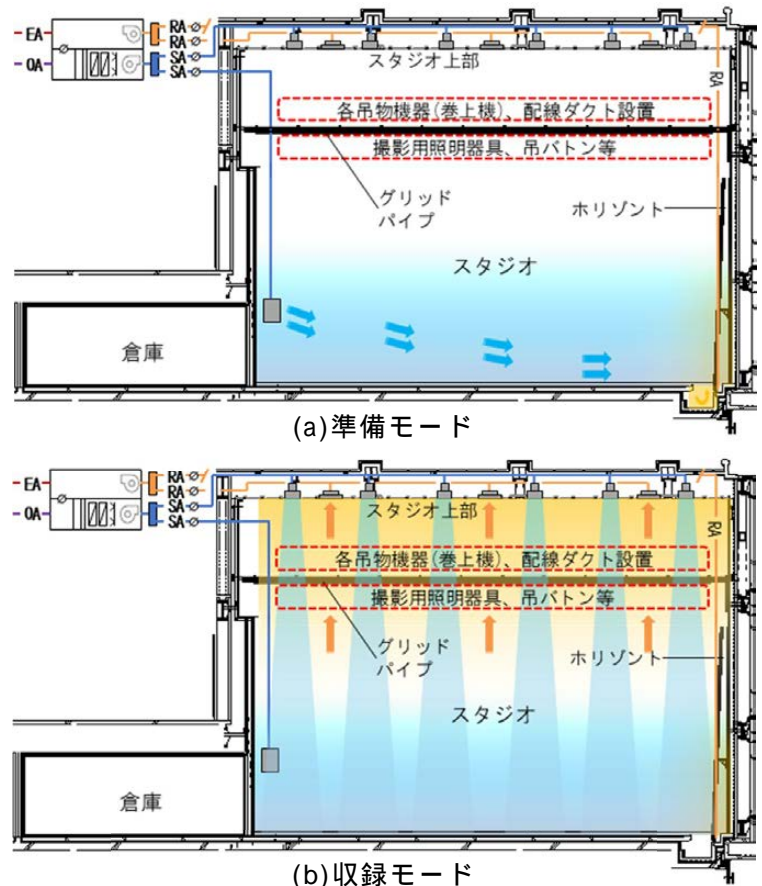


図 3-4 スタジオ可変空調システム概念図

4 . スマートウェルネスに配慮した普及性の高い省エネルギー技術

4 - 1 . 眺望性と省エネルギー性を両立した高性能ファサードシステム

ガラスファサードの建築において、外装の熱負荷低減のために、様々な高性能ファサードシステムが導入されてきている。本計画では、敷地南側に広がる大阪城公園に対する眺望性の確保と日射遮蔽性能を両立した高性能ファサードを構築している。低層、高層ともに階層間に庇効果のある PCa 庇

(プレキャストコンクリート)を採用し、建設時の省力化・省資源・省CO₂を図っている。また、太陽光追尾電動ブラインドを採用し、日射制御を実施している。階高の異なるファサードに対して、眺望性と意匠性を確保するとともに高い日射遮蔽性能を確保している。

(a)低層部外装

低層部の外装計画を図 4-1 に示す。川に面した低層部の外装は、シングルスキンのカーテンウォールに PCa 庇とアルミキャストの外部簾を組み合わせた構成としている。低層部は階高が高くなっているが、上部に外部簾+ペアガラス、下部に銀の幕を 3 層に重ねた Low-e ペアガラス(以降、高性能 Low-e ガラス)+太陽光追尾電動ブラインドとすることで眺望の確保と日射負荷低減を両立した計画としている。5,500 mm の階高に対して、PCa 庇と外部簾により FL+2,300 mm 以上の日射を遮蔽し、内部の明るさ感を同時に実現している。

外部簾はアルミダイキャストで製作し、図 4-2 に示すパラメトリックデザイン設計手法により、意匠性・省資源・日射遮蔽効果の最適化を図っている。外部簾は縦ルーバーと横ルーバーの両要素を併せ持つハニカム形状としている。ポリゴン径(P)、奥行き(D)、見下げ角度(θ)、方位角度(φ)の4つを変数として定義し、年間100%の日射遮蔽を条件判定とし、grasshopperを用いてシミュレーションを行った。θ・D・Pを変化させた時の条件達成域と体積の解析及び年間日射量のシミュレーションから重量や施工性を考慮してデザインを決定している。図 4-2 に示す通り、年間日射量のシミュレーションでは、外部簾の背面部については、完全に直達日射を遮蔽できていることが確認できる。

(b)高層部外装

高層部の外装計画を図 4-3 に示す。OBP 街区から 45 度ふれた高層部の外装は、水平線を基調とした単層のダブルスキンカーテンウォールとし、眺望の確保と日射負荷低減を両立した計画としている。単層ダブルスキン(以降、DS)は、屋外側から単板ガラス+太陽光追尾電動ブラインド+高性能 Low-e ガラスの構成としている。また、層間の PCa 庇により外部側の窓面積を低減(階高に対する室内側ガラスの面積比 0.69)して熱負荷の抑制を図り、その形状を「ヒ」の字型の段差形状とすることで、外部側ガラスの H 寸法を室内側より高くして足元への視線の抜けを確保している。屋上庭園が敷地南側の川面を介して大阪城公園の緑と繋がるダイナミックな風景を楽しめるように配慮しながら、高い環境性能を実現している。

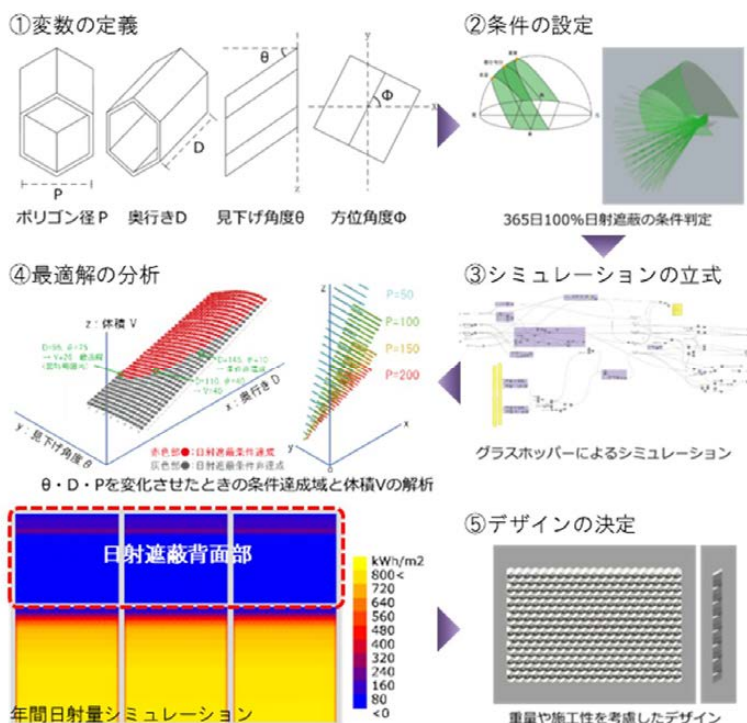


図 4-2 低層部簾シミュレーション

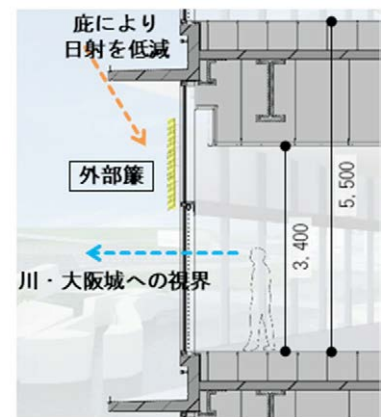


図 4-1 低層部外装計画

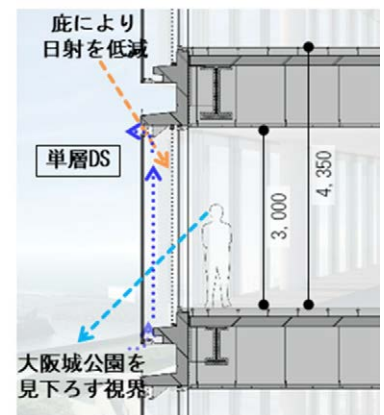


図 4-3 高層部外装計画

4 - 2 . デシカント外調機による潜顕分離空調と気流感変動制御システム

4 - 2 - 1 . 執務エリアの空調計画概要

近年、知的生産性やウェルネスなどの室内環境に関する意識が高まっている中で、空調分野においても室内温熱環境の快適性にかかわる多様なニーズに応えることが必要になってきている。本計画では潜顕分離空調により、快適性と省エネルギー性を高めている。また、気流感変動制御システムにより、吹出口からの気流を変化させて気流感を与えることで、執務者の快適性を高めている。

執務エリアの空調計画概念図を図 4-4 に示す。潜熱処理には、回転式の全熱交換器を組み合わせたデシカント外調機を採用しており、除湿ローターの再生熱として、コージェネレーションシステムの排熱を利用することで、快適性と省エネルギー性を両立している。顕熱処理の空調機は、単一ダクト VAV 方式とし、気流感変動制御システムを導入している。給気風量と給気温度を制御することで、処理熱量は一定として、エネルギー消費量を増やすことなく快適性を高めている。

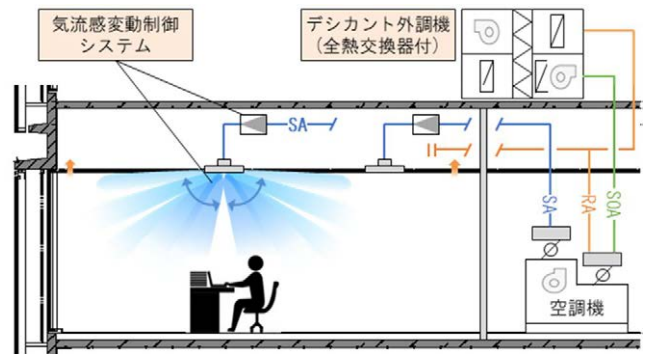


図 4-4 執務エリアの空調計画概念図

4 - 2 - 2 . 気流感変動制御システムの開発と計画

一般的な空調方式では、熱負荷が変動しない状態であれば気流感が一定となる。これに対して、熱負荷が変動しない状態でも気流感が一定ではなく変動する空調システム(気流感変動制御システム)を構築することで、対象エリア全体の温熱環境の向上と快適性を図ることを目的としている。

従来の変風量制御システムは、給気温度を一定とし(給気温度リセット制御を含む)、変風量装置の風量を変更することで、目標室内温度となるように制御している。気流感変動制御システムは、機器構成は変風量制御システムと同一であるが、制御手法が異なっている。制御の概念図を図 4-5 に示す。室内の熱負荷が変動しない状態でも、給気温度及び給気風量を変動させることで、室内温熱環境の快適性の向上と室内温度補償の両立を意図している。制御としては、目標室内温度から求められる基準給気温度と基準給気風量をベースとして、同じ処理熱量となるように給気温度と給気風量を周期的かつ強制的に変動させることで、室温を一定に保ちつつ空調気流を変動させて気流感を確保することである。

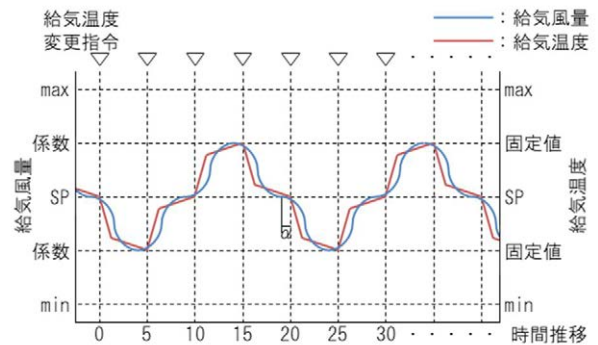


図 4-5 気流感変動制御システム概念図

4 - 2 - 3 . 室内温熱環境の実測結果

気流感変動制御システムを導入している執務エリアを対象として実施した。実測は、制御状況及び気流特性の確認を目的として 2020 年 8 月 2 日に実施した。実測条件として、室温設定を 26 とし、対象エリアのブラインドは常時全閉とした。また、実運用を想定して約 33W/m²の模擬負荷を設置した。実測ケースを表 4-1 に示す。この実測ケースを Case1 2 3 の順で実施し、1 分間隔で計測を行った。気流感変動制御の給気温度及び給気風量の変動周期は 20 分としている。水平方向及び鉛直方向の測定点及び測定状況を図 4-6 に示す。対象とした執務エリアの全吹出口に対して同様のケース制御を行った上で、1 つの吹出口周りに 6 か所の測定点を設け、室内温熱環境及び吹出口からの気流特性を確認した。また、C 点にはアメニティマネキン(温度、湿度、風速、輻射熱のセンサーを埋め込んだ人体形状のマネキン)を設置し、風速を計測した。給気風量は対象エリアの VAV での計測値としている。当該 VAV の系統に対しては、図 4-6 に示した 2 つの吹出口が接続されている。

表 4-1 実測ケース

	気流感変動制御	給気風量	給気温度	室温設定	変動周期
Case1	なし	±0%	±0°C	26°C	20min
Case2	あり	±50%	±5°C		
Case3	あり	±100%	±10°C		

集中実測で計測した給気風量及び給気温度の経時変化、FL+1,100の水平温度分布を図4-7~8に示す。給気風量に関して、気流感変動制御なしのCase1において給気風量が所定最大風量に達しており、Case2以降の室内温度がCase1と比較して高いこと及び基準給気温度が下がっている様子が見受けられないことから、基準給気風量が下がることはないと判断でき、基準給気風量が終始上限に達していることがわかる。そのため、給気風量は実質+側の制御に入れていないが、-側の制御については、基準給気風量に対して、Case2で約-50%、Case3で約-100%(風量下限に到達)と設定通り変動していることが確認できる。

一方、給気温度はCase2で約 ± 2.5 、Case3で約 ± 5 と設定値に対して半分程度の幅で変動していることが確認できる。これはバルブの応答性及び制御のタイムラグ等が原因と考えられるが、それらを考慮して制御の変動幅と周期を調整する等で解決が期待できる。また、給気風量が実質+側の制御に入れていないため、Case2で0.25、Case3で0.5ほど室温の周期変動が見られ、Case3では処理できなかった熱が溜まり室温が上昇している。ただし、測定エリアには会議室や休憩室等が多く設けられており、エリア面積と比べ執務者が少ないのに対し、模擬負荷をかけすぎたことも要因と考えられる。

上記より、気流感変動制御システムについて、制御状況を確認できた。また、Case2の制御状況下において、室内負荷にかかわらず室温変動が抑えられ、給気風量が変動することが確認できた。

FL+1,100の水平風速分布を図4-9に示す。気流感変動制御ありの場合では風速は給気風量におおよそ比例し、主に0~0.4m/sの間で周期的に変動しており、FL+1,100において測定点C、D、B、Aの順に強い気流を受けていることが分かる。ただし、C、D点は吹出口aと、その北側の吹出口(以降、吹出口g)の間に位置し、気流がペリメータ側に流れていることから、吹出口gからの気流を受けていると考えられる。

アメニティマネキンによる風速計測結果を図4-10に示す。給気風量上限時では、上半身に最も強い気流を受けており、吹出口gからの気流を主に受けていると仮定すると、給気風量上限時は吹出口から南に3,300mmの地点において気流が居住域に下降する傾向があることがわかる。

上記より、居住域での風速が0~0.4m/sで周期的に変動し、オフィス内の気流速度に適しており、執務者の気流感が変動していると考えられる。

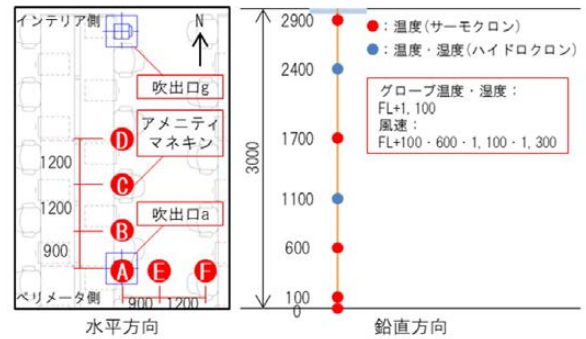


図4-6 測定点

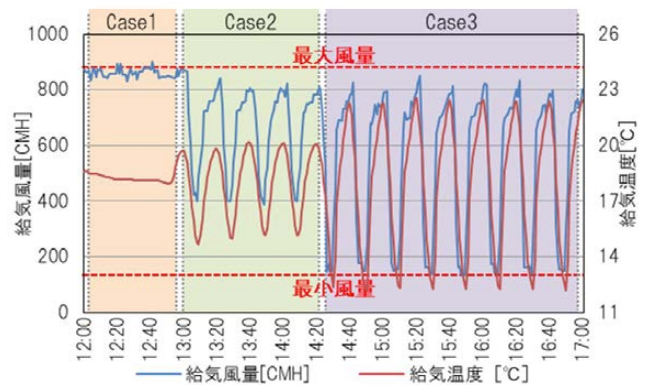


図4-7 給気風量・給気温度経時変化

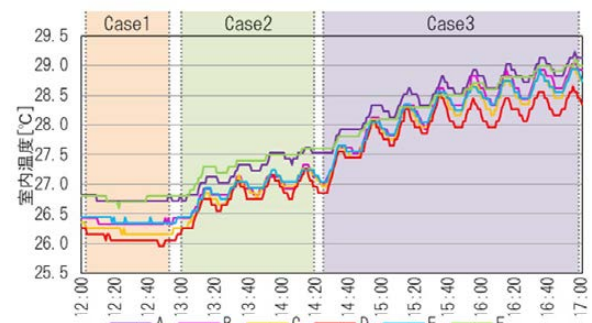


図4-8 室内温度計測経時変化(FL+1,100)

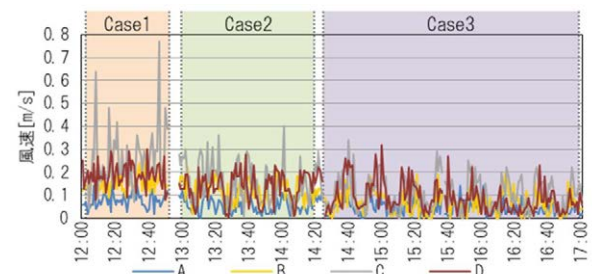


図4-9 風速計測経時変化(FL+1,100)

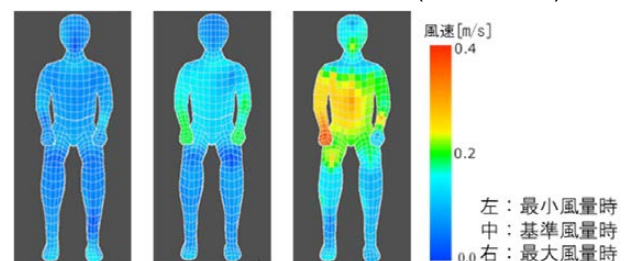


図4-10 アメニティマネキンによる風速計測結果

4 - 3 . 厨房の利用実態に応じた換気風量制御システム

4 - 3 - 1 . 厨房計画概要

食堂併設の厨房は、利用人数が多くエネルギー消費量が大きい傾向にある。また、厨房内における温熱環境は調理者の健康や生産性に与える影響が大きいいため、作業空間の快適性を保つことが必要不可欠である。従来厨房における換気量については、様々な基準や指針があるが、いずれも換気量が多く、エネルギー消費が大きくなる。また、大量の外気を室内に供給する必要があるため、作業空間の温熱環境に大きな影響を及ぼすことが考えられる。本厨房は、換気風量制御と置換空調の併用により省エネルギー化と温熱環境の改善を両立することを目指して計画を行っている。

本厨房は、ガス・電気併用の厨房であり、主厨房・洗浄室から構成される。洗浄室の換気は、外気処理空調機による給気及び食堂から流入する空気が排気フードを通じて排気される計画としている。主厨房は、換気のための導入外気を空調処理空気と未処理空気に分けて給気を行うことで、厨房プランニングとの整合を図っている。空調処理空気は天井面に新規開発した半円形不燃ソックダクトを設置することで、衛生面(埃付着防止)の配慮と共に、天井給気による置換空調を計画している。空調機からの新鮮空気を天井面から主厨房内の各エリアに給気し、排気フードと天井排気口を通じて排気される計画としている。未処理空気は、蒸気系厨房機器の背面壁から低風速での吹出しとし、蒸気系フードでショートパスさせて排気することで外気処理エネルギーを削減している。

厨房機器の負荷率は時間毎に大きく変動しており、負荷率に合わせて換気風量を制御することで、大幅な省エネルギー化が期待できる。本厨房では、換気量を厨房機器のガス流量及び電流値により制御を行い、換気動力と外気処理空調機の処理熱量の削減を図っている。換気システム概念図を図4-11に示す。換気量制御の考え方として、排気は、主厨房・洗浄室に対して2台の排気ファンとしており、厨房機器の低負荷状態での小風量時にも対応可能な計画としている。給気は、前述の通り外気処理空調機、また未処理外気を給気ファンにより供給している。フードの排気風量制御は、各厨房機器のガス流量及び電流値により必要風量を算出し、フード毎にVAVの比例制御を行っている。また、フード毎の厨房機器からそれぞれ算出した定格排気風量の50%をVAV下限値としている。排気ファンは主厨房・洗浄室に設置している各VAVの要求風量を合計して必要風量を算出し、回転数制御としている。上記に対する給気風量制御は、未処理外気に関しては蒸気系フードの厨房機器のガス流量及び電流値から給気VAVの比例制御を行い、空調処理空気に関しては、蒸気系以外のフードの厨房機器のガス流量及び電流値により必要風量の算出を行い、VAVの比例制御としている。給気ファンは、各VAVの風量合算により、回転数制御としている。

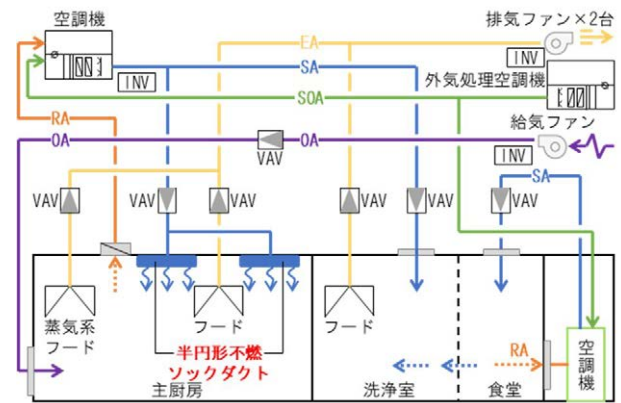


図 4-11 厨房換気システム概念図

4 - 3 - 2 . 実測結果

2020年1月22日～24日に、主厨房・洗浄室の居住域温湿度の測定を行った。また、同期間の厨房換気ファンについてBEMSデータを分析した。

主厨房における鉛直温度の時刻別推移を図4-12に示す。天井面に近づくにつれて、温度が上がっており、特異点を除いて最大約5℃の差が見られたことから、置換空調により温熱環境が適切に保たれていると考えられる。また、代表日のファン消費電力量は、厨房機器の使用状況に応じてファンの出力が制御されており、風量制御が無い場合と比較して約39%の削減ができていたことが確認できた。

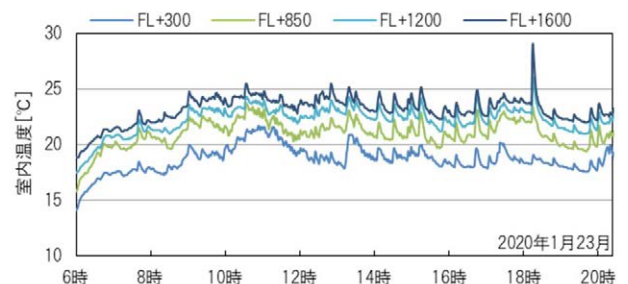


図 4-12 主厨房内鉛直温度分布

5 . 非常時のエネルギー自立と省エネルギー・省資源の実現

5 - 1 . 非常時のエネルギー自立と放送機能継続のためのBCP計画

5 - 1 - 1 . 非常時のエネルギー自立

本建物では放送機能継続のための非常用発電機以外に常用発電機として、非常時にも運転可能な中圧ガス利用のコージェネレーションシステム(CGS)を導入している。CGSのシステム概念図を図5-1に示す。CGSは、常時はデマンドカットや排熱利用(デシカント外調機の再生熱・冷房・暖房・給湯)による省CO₂を実現している。非常時には、一般部及び共用部への電力供給によって帰宅困難者への対応を図ると共に中圧ガス利用による非常時の省CO₂を実現している。

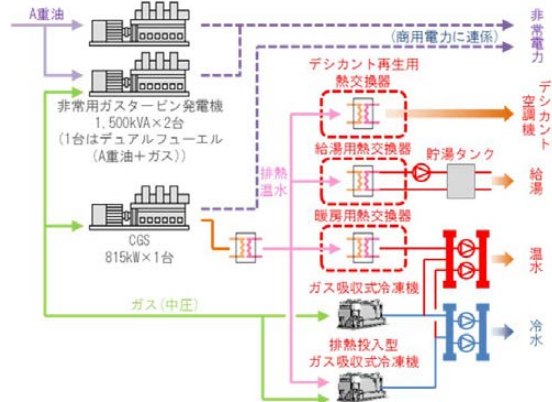


図 5-1 CGS システム概念図

5 - 1 - 2 . 放送機能継続のためのBCP計画

(1) 浸水対策

計画地は、1)東南海・南海地震による津波が来襲した場合、2)淀川が氾濫した場合、3)大和川が氾濫した場合、4)東海豪雨級(1時間最大降水量 97 mm)の降雨の場合でも浸水しないと想定されており、放送施設に適した敷地である。

(2) 地震・インフラ停止時の対応

耐震設計は、災害拠点等で採用される耐震グレード特Sとし、再現期間 500 年の大地震に対して軽微な被害に留まる設計により、大地震直後も継続使用可能である。具体的には、基礎直上の免震層と低層部と高層部の切替階に制振層を設けることで大地震時の揺れを小さくしている。各設備機器・配管の支持固定は、地震時の各階応答加速度を考慮した設定としている。各インフラ停止時に対しては、オイルタンク(非常用発電機用、5日分×2基)・上水(4日分)・雑用水(7日分)・空調用冷却塔補給水(7日分)・非常用汚水槽(7日分)としている。電力引込みは、異変電所による専用線・予備線の2回線受電方式とし、停電時の電源は、非常用発電機(ガスタービン)を2台設置し、内1台をA重油と中圧ガスで運転可能なデュアル燃料仕様としている。また、発生し得る停電を想定し、停復電について17パターンを作成し、停電発生時の重要負荷への電力供給を可能としている。

空調熱源システムは、各インフラ停止時を想定し、電気・ガス熱源の組合せとしている。災害時の熱源運転パターンを図5-2に示す。中央監視により、運転パターンを選択することで、最重要系統の空調運転継続に対応している。

(3) 重要度区分に応じた設備計画

本建物内の各機能・各居室に応じて、電源重要度区分、空調重要度区分の設定をしている。この重要度区分に応じて、変電設備仕様、幹線、分電盤・動力盤仕様、空調機台数分割、空調配管2系統対応について計画している。

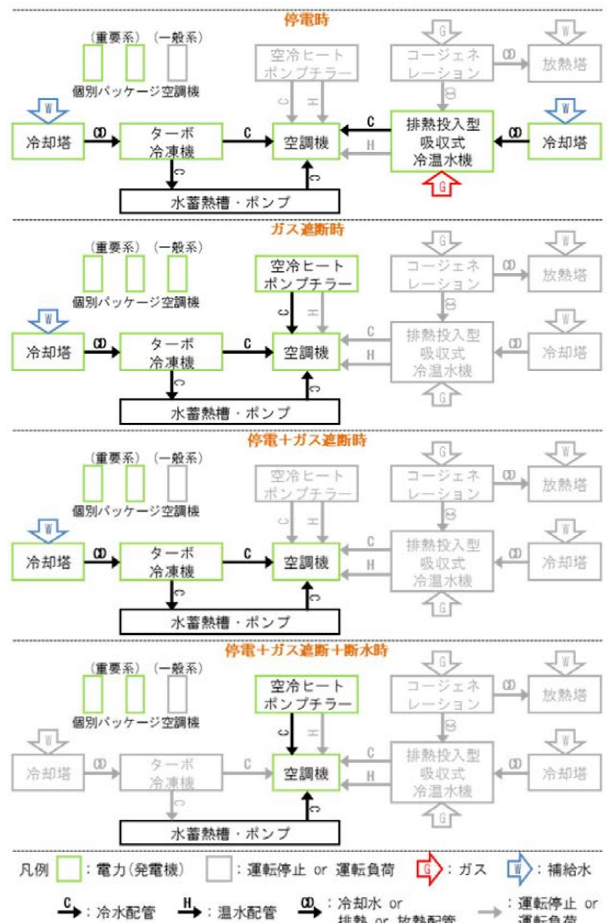


図 5-2 災害時の熱源運転パターン

5 - 2 . 省エネルギー・省資源

(1) ラック室における不燃ソックダクトを用いた大温度差空調システム

無結露、全周からの均一な吹出し、不燃化による安全性向上、省力化が可能な不燃ソックダクトをラック室空調に採用している。ラック室の空調概念図を図 5-3 に示す。ソックダクトについては、吹出しを層流に近い状態として置換空調が可能となる。また、冷水大温度差と変風量制御による搬送動力の低減に加え、簡易キャッピングを併用することで、空調効率を高め、省エネルギー性を高めている。

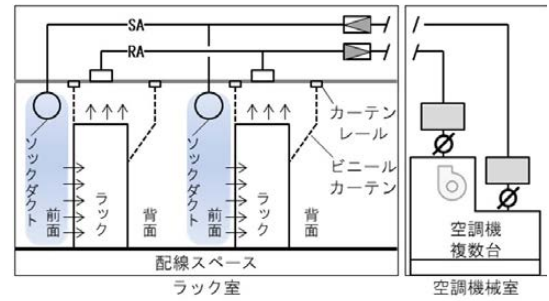


図 5-3 ラック室空調概念図

(2) BEMS による放送施設のエネルギーの見える化

BEMS は、ビル管理者だけでなく、建物を利用する人に対する見える化をサポートする計画としている。システム構成として、修繕や将来更新時にフレキシブルに対応可能なように、BACnet にてサブシステムと接続する方式としている。また、放送施設特有の室用途(スタジオ、副調整室、ラック室)について、エネルギー使用状況をデジタルサイネージに表示することで、省エネルギー行動の推進を図っている。このデジタルサイネージによるエネルギーの見える化は、通常時には省エネルギー行動を促進し、非常時には災害情報の表示などの情報提供に活用し、地域貢献に寄与できるシステムとしている。

6 . 省エネルギー効果の検証

月別一次エネルギー消費量と年間一次エネルギー消費量(2020年4月～2021年3月)を図 6-1～2 に示す。全体で 1,980MJ/m²/年であり、旧社屋に対して 44%低減と大幅な省エネルギー化を実現した。環境評価としては、CASBEE 建築評価認証で S ランク(BEE=4.3)、CASBEE 大阪みらいで S ランク(BEE=4.3)を取得している。また、本計画は国土交通省の平成 28 年度サステナブル建築物等先導事業(省 CO₂ 先導型)に放送施設として初めて採択されている。

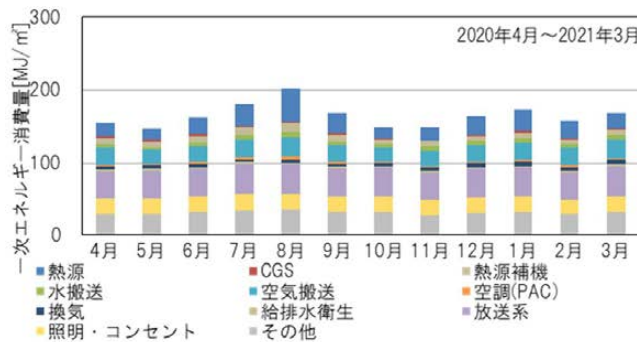


図 6-1 月別一次エネルギー消費量
(2020年4月～2021年3月)

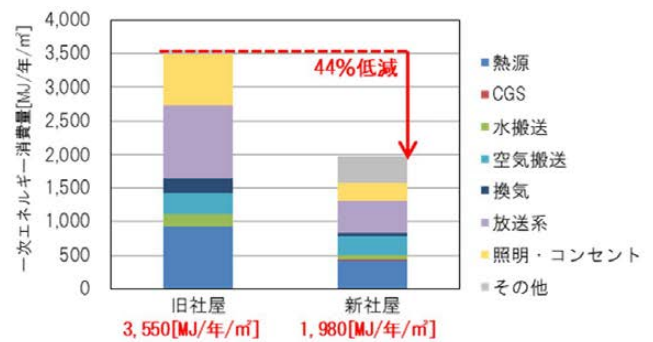


図 6-2 年間一次エネルギー消費量
(2020年4月～2021年3月)

7 . おわりに

本稿では読売テレビ新社屋の環境・設備計画について、採用技術の概要と検証について報告した。

今後も継続的に運用データの検証を行い、本実績を他用途への展開に取り組んでいく予定である。



写真 7-1 外観写真

近畿産業信用組合本店～都市部における高層事務所ビルの ZEB の実現～

Kinkisangyou Shinkumi Bank Head Office ～Realization of Zero Energy Buildings in Urban Areas Office Tower～

大成建設株式会社設計本部
Taisei Corporation Design Division
永吉 敬行
Takayuki Nagayoshi

キーワード：ZEB (Net Zero Energy Building)、高層事務所ビル (Office Tower)、
ダブルスキン (Double Skin Facade)、再生可能エネルギー (Renewable energy)、
顕熱交換器 (Sensible Heat Exchanger)

1. はじめに

従来の ZEB を達成した建築の多くは郊外型低層型で、外壁率が低く日射負荷などの外乱が小さい。さらに郊外にあるため十分な敷地と建物広さが確保されており、先進的な再生可能エネルギー・未利用エネルギー技術などの導入により省エネルギー・創エネルギー効果を得やすい。一方、都市型高層型は外壁率が高く、高層であるために空調などの搬送動力が増大し、ZEB 達成の難度が上がる (図 1)。都市型高層型での ZEB の普及を目的とし、都市型高層型の事務所ビルにおいて、各種の省エネルギー技術を積み重ねることで ZEB Ready を達成した建物を構築したので、その報告を行う。

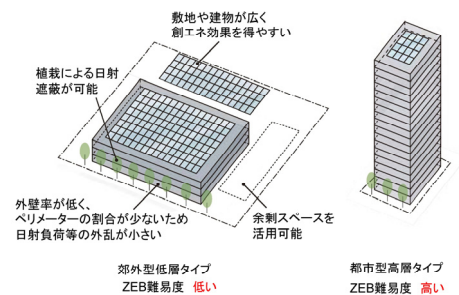


図 1 ZEB 達成の難易度



写真 1 建物外観

2. 建築・設備計画概要

本建物は、外壁に全層型のダブルスキンを用いたシンボリックな外観デザインにより、地域のランドマークとなる建物を目指した。図 2 に、配置図、表 1 に、建物概要、写真 1 に、建物外観を示す。外皮は日射負荷に配慮し西面に開口部を設けず、南・東面に設けた開口部はダブルスキン構造とし、室内空間の快適性を確保しつつ外壁の高断熱化を行う計画とした。

図 3 に、ダブルスキン概念図を示す。ダブルスキンのインナースキンは Low-E 複層ガラスとし、インナースキンとアウトースキンの中間層内に太陽追尾電動ブラインドを設置し、日射・外気による熱負荷の低減を図った。

図 4 に、主な導入技術を示す。持続可能な都市型高層 ZEB の実現をコンセプトとして、多くの技術を計画に取り入れた。



図 2 配置図

表 1 建物概要

建築主	近畿産業信用組合
所在地	大阪府大阪市中央区
設計	大成建設株式会社一級建築士事務所
監理	大成建設株式会社 工事監理一級建築士事務所
建築施工	大成建設・長谷工コーポレーション 建設工事共同企業体
空調衛生施工	大成温調株式会社
電気施工	株式会社きんてん
エネルギー	大成建設株式会社エネルギー本部、 大成有楽不動産株式会社
敷地面積	1,134.39㎡
建築面積	658.76㎡
延床面積	11,335.38㎡
構造	鉄骨造 (一部鉄骨鉄筋 コンクリート造)
階数	地上18階、地下1階、 塔屋1階
建物用途	事務所 (金融機関本店)
竣工	2019年1月

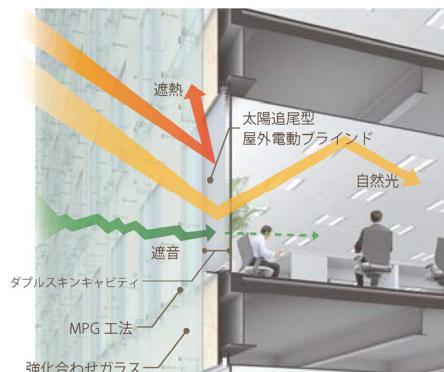


図 3 ダブルスキン概念図



図 5 ZEB
リーディング・
オーナー登録票



図 6 CASBEE
S ランク登録票



図4 主な導入技術

本計画では、一次エネルギー消費量を基準建物である約 1,142MJ/年 m² から省エネルギーのみで 60%以上削減の 448MJ/年 m² (BEST BEI=0.39 (その他含まず、創エネルギー含む)) とした計画を行った。そして、(一社)環境共創イニシアチブが定める ZEB リーディング・オーナー登録制度において、ZEB Ready の登録を行った (図5)。さらに都部の高層事務所ビルで ZEB Ready を目指した取り組みについて、波及性・普及性が期待できるものと評価され、平成 28 年度 (第 2 回) サステナブル建築物など先導事業 (省 CO₂ 先導型) に採択された。その他に、総合的な建築物の環境性能評価である CASBEE S ランク (第三者認証) を取得している (図6)。

3. ファサードの高機能化の取り組み

3.1 ダブルスキン構造による高断熱化

(1) ダブルスキンとシングルスキンの外皮性能比較

図7に、ダブルスキンとシングルスキン (Low-E 複層ガラス) の外皮性能比較を示す。ダブルスキンはシングルスキンに比べて BEST-PAL* で約 5% 低く、外皮性能が高いことが分かる。なお、4~6 月の BEST-PAL* は、シングルスキンはダブルスキンに比べて約 3~9% 低いが、これは冷房負荷のある季節で室温より外気温が低い時に、シングルスキンの方が熱貫流率が大きいために、冷熱が室内へ移動し執務室の冷房負荷が低減されるからである。本建物では、年間での外皮性能の高さを評価し、ダブルスキンを導入した。

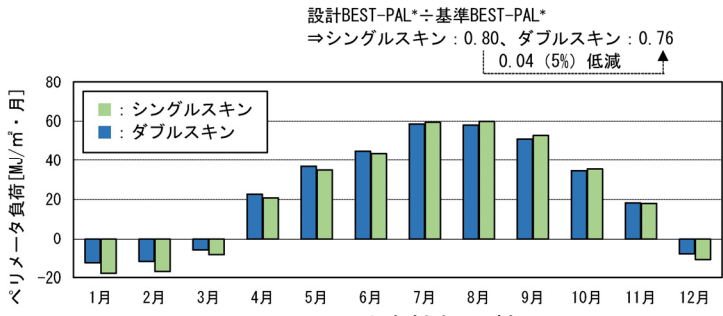
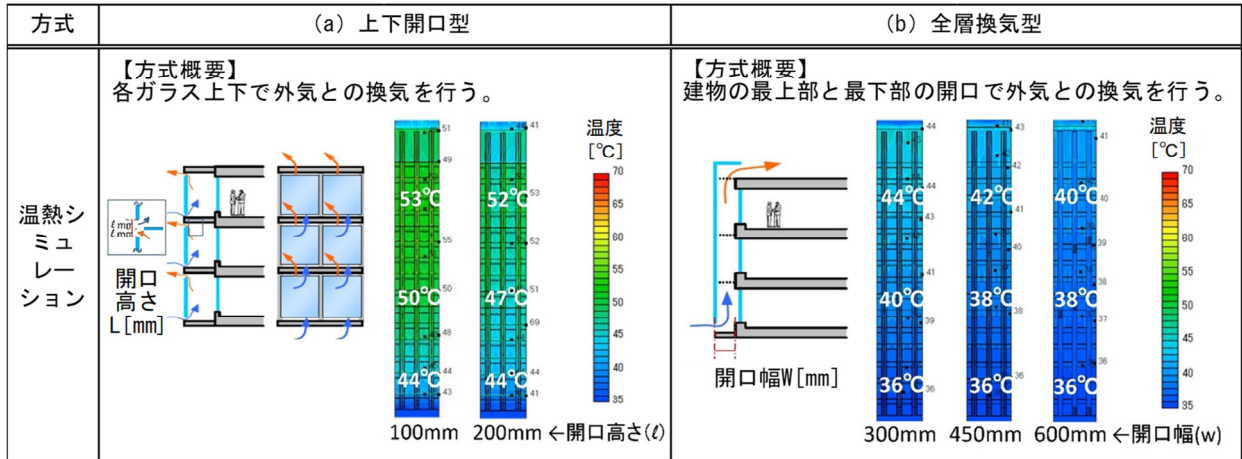


図7 外皮性能比較

表 2 に、ダブルスキン方式比較（夏期想定）を示す。ダブルスキン形状を決定するにあたり、温熱・気流シミュレーションを実施した。全層換気型は上下開口型に比べて気流が速く、換気効率が向上しダブルスキン内の温度が低くなることが確認できた。夏期の排気による熱負荷低減の効果が高いことから、本建物では全層換気型を採用した。

表 2 ダブルスキンの方式比較（夏期想定）



(2) ダブルスキン内の温熱・気流シミュレーションと実測値の比較

計画時の温熱・気流シミュレーションの検証を行うため、実測値との比較を行った（図 8）。夏期のシミュレーションでは外気温度約 36°C から約 46°C と約 10°C の温度上昇が確認できた。実測値での温度上昇は時間帯により外気温度や日射量が異なるため、温熱・気流シミュレーションに比べてやや低いものの、実測値およびシミュレーション共に一定の温度上昇があることが確認できた。また、冬期のシミュレーションでは外気温度約 5°C から約 24°C へと約 19°C の温度上昇が確認できた。夏期同様に実測値での温度上昇は時間帯により外気温度や日射量が異なるため、温熱・気流シミュレーションに比べてやや高いものの、実測値およびシミュレーション共に一定の温度上昇があることが確認できた。

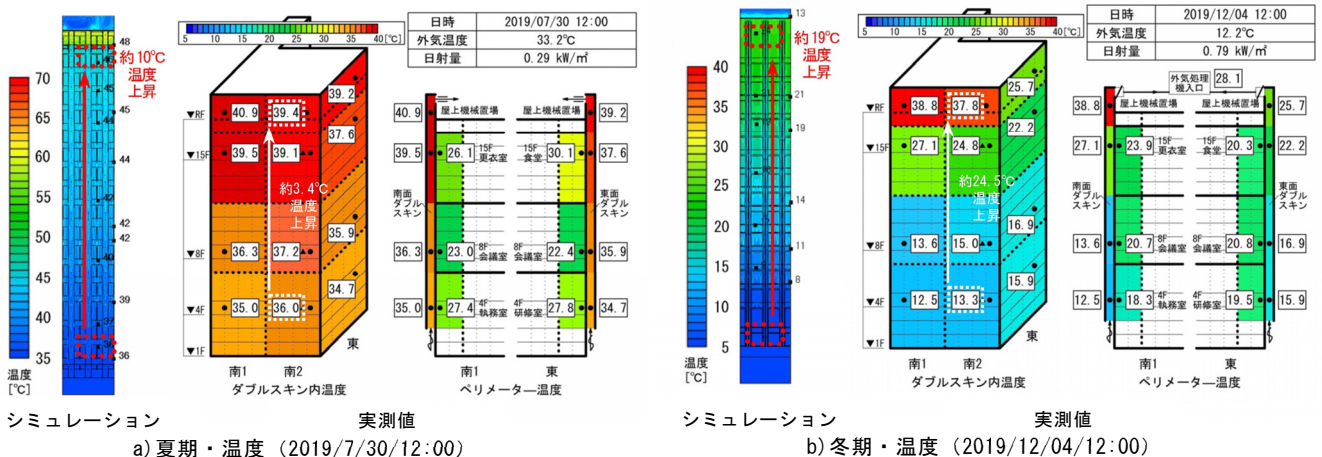


図 8 ダブルスキン内の温度分布比較

3. 2 自然エネルギーの有効活用

(1) ダブルスキン内の熱利用

図 9 に、ダブルスキン内排熱の空調利用概念図を示す。夏期は、ダブルスキン内の温度上昇を防ぐために、ダブルスキン内は自然換気により、屋外へ排気を行ってしている。一方、冬期は、冷たい外気をダブルスキン内で日射により昇温後、外調機へと導き、暖房の予熱として利用する。中間期は、冬期と同様にダブルスキン内の熱を外調機へと導き、過冷却除湿後の再熱エネルギーとして利用した。これらのシステ

ムにより良好な環境を形成しながら省エネルギー化を図った。

(2) ダブルスキン内排熱利用ダンパの開発

ダブルスキン内の排熱利用を行うために、ダブルスキン上部から外調機までダクトにて繋いでいる。夏期と冬期・中間期で空気の流れの切り替えを行うため、ダブルスキン上部に切り替え機構を設置した(図10)。

通常、ダブルスキンの排気側出口形状は雨の侵入防止等の理由からガラリで構成されていることが多いが、ガラリ形状ではダブルスキン内の空気を直接外調機に導けない。そこで、ガラリの代わりに自然換気用の排気開口と外調機のダクト接続用の開口の両方の機能を有し、切り替え可能なダンパの開発を行った。形状としては、ダンパ前面に自然換気用の開口、側面にダクト接続用の開口を設けた。ダンパはダブルスキン側に閉じる羽根と、屋外側に閉まる羽根で構成し、その間に仕切り板を設置することで、切り替えが可能な形状とした。

ダブルスキン内排熱利用ダンパを設置した場合でも、ダブルスキン内の自然換気が有効に働く形状の検証を行った。ダブルスキン内排熱利用ダンパの内部抵抗を小さくするため、開口部面積を大きく確保し、抵抗を抑えられる形状とした。

検証では、温熱・気流シミュレーションを実施すると共に1/2スケールのモックアップを作成し実験にて確認を行った。実験の結果、内部抵抗は通常ガラリ(圧損値14.9Pa)に比べてダブルスキン内排熱利用ダンパ(圧損値3.7Pa)で、ダブルスキン内排熱利用ダンパの方が内部抵抗を約75%低減することができ、形状の有効性を確認した(図11)。

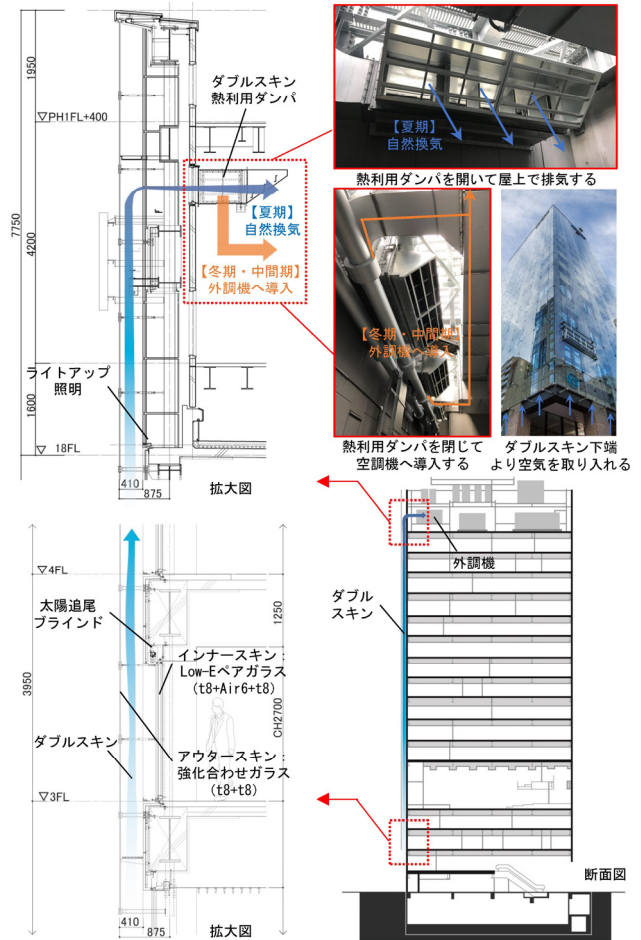


図9 ダブルスキン内排熱の空調利用概念図

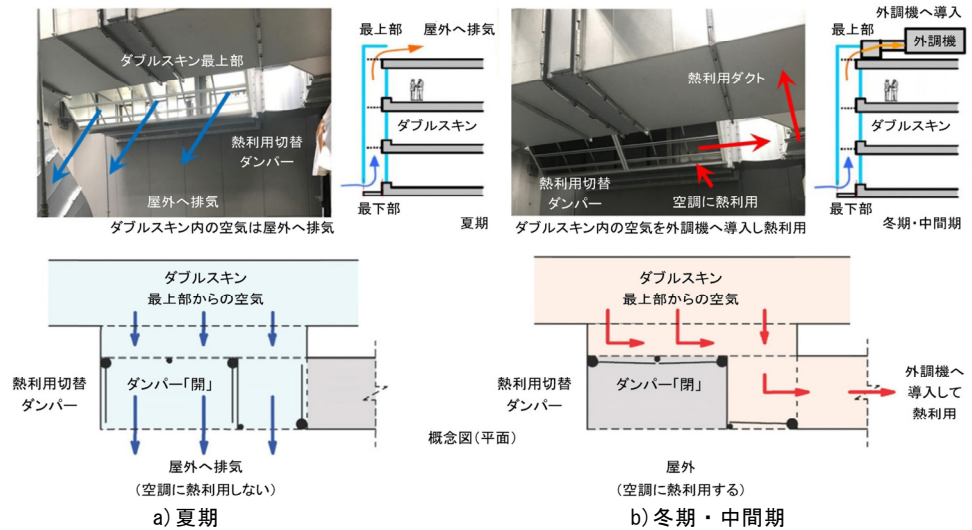


図10 ダブルスキン内排熱利用ダンパ概念図

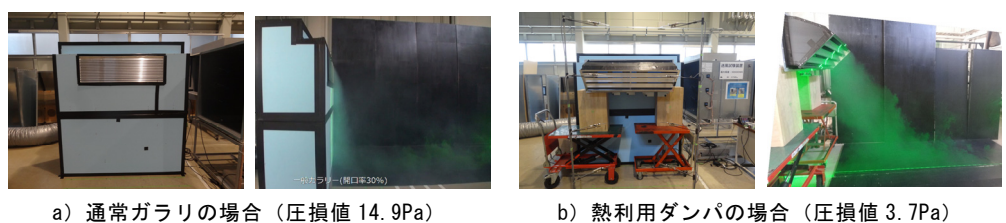


図11 モックアップ実験

(3) 竣工後の実測結果

竣工後、ダブルスキン内に設けた制御用の温度・風速センサによりダブルスキン内の排熱利用の効果を検証した。晴天日のダブルスキン内温度は、6～11時にかけて日射量の上昇に合わせてダブルスキン内の温度も上昇し、11時に外調機の外気取入温度は外気温度に比べて約16.6℃温度上昇が確認できた(図12)。

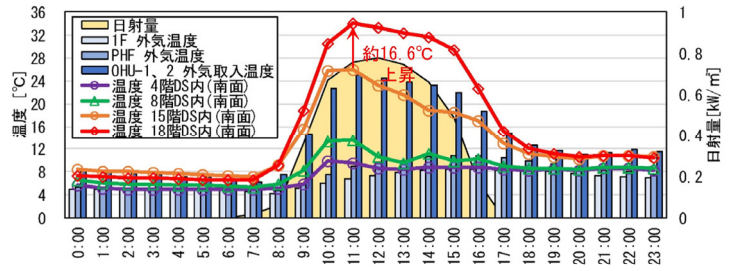


図12 晴天日のダブルスキン内温度の経時変化
(2021年1月13日)

図13に、日射量と温度の関係を示す。外気温度と日射量はほとんど相関がないのに対し、ダブルスキン内の排熱利用時の外気取入温度と日射量はやや相関が見られる。ビル影の影響で、日射量と外気取入温度の上昇率にばらつきはあるが日射量の上昇に合わせて約5～20℃の温度上昇が確認できた(図14)。

方位毎のダブルスキン内温度は、夏期は南面、東面に分布傾向に大きな差は見られなかったが、冬期昼間は東面に比べて南面の温度分布が高い傾向にあった。冬期は夏期に比べて太陽高度が低く、ビル影の影響により東面の温度分布が低い傾向になったと考えられる(図15)。図16に、冬期の昼間の外調機の平均外気温度、平均風量、平均入口温度、図17に、冬期の排熱利用によるエネルギー削減量を示す。外調機入口温度は、OHU1に比べてOHU2の方が高い傾向にあった。OHU2の方がダブルスキンに近い位置に設置してあるため、空気搬送時のダクトからの熱損失が小さかったと考えられる。ダブルスキン内排熱の空調利用による冬期のエネルギー削減量の合計は、約250,000MJであった。

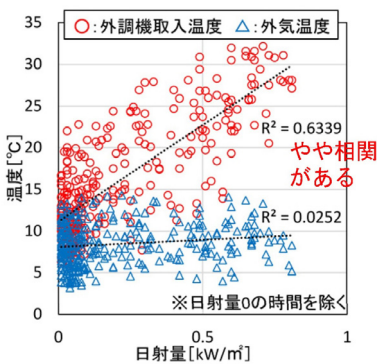


図13 日射量と温度の関係
(2019年12月)

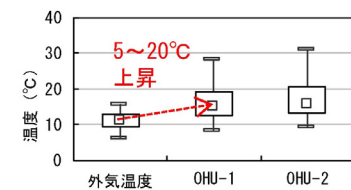


図14 熱利用時の外調機入口温度の分布(2019年12～翌2月7～21時)

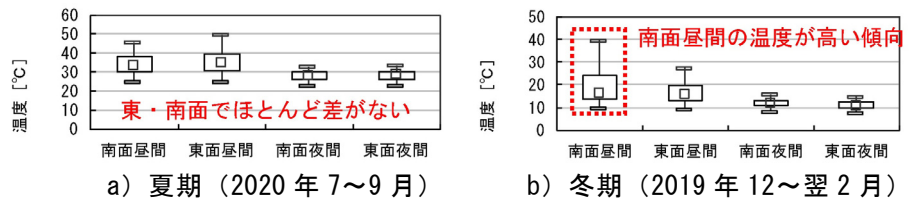


図15 方位毎の18階ダブルスキン内温度の分布

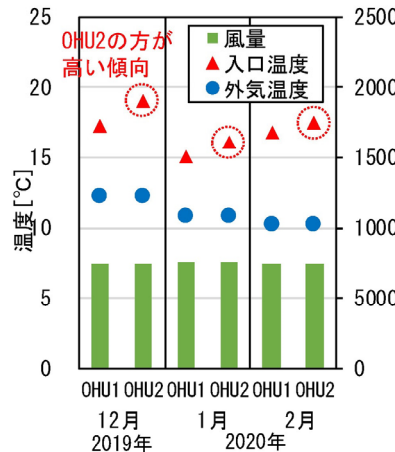


図16 平均外気温度、外調機風量、入口温度

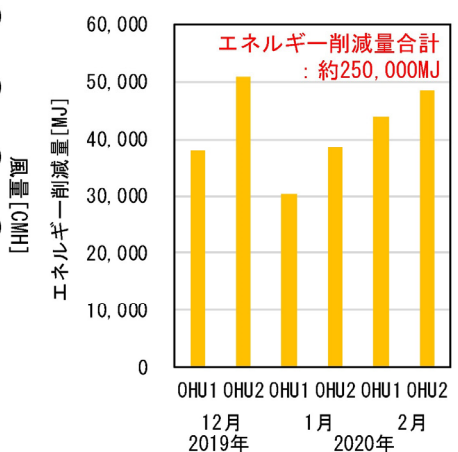


図17 エネルギー削減量(冬期・昼間(7~21時))

4. 省エネルギーへの取り組み

4.1 汎用省エネルギー技術の積極的な導入

(1) 外気導入量の最適化

図18に、空調システム概念図を示す。屋上に設けた外調機から執務室内に外気処理した新鮮空気を供給し、パスダクトにて共用廊下へ導き、トイレや倉庫などからの排気を外調機に設けた全熱交換器へ戻して熱回収を行っている。カスケード換気(非居室への空調空気の2次利用)方式とすることで外気導入量を最適化し、外気負荷の低減を図った。トイレには天井埋込型のオゾン脱臭装置を設け、さらに外調機の

全熱交換器はイオン交換樹脂吸着剤を利用した臭気移行防止型を採用し、熱交換時の臭気対策を行い、快適性の向上と省エネルギーの両立を図った。さらに、執務室などへの外気導入量は各室内に設けたCO₂センサーによる変风量（VAV）制御や、照明と連動した定风量（CAV）制御とすることで最小风量制御を行い、外気導入量の最適化を図った。従業員食堂のちゅう房換気には未処理外気40%と外調機による処理外気60%を利用した、省エネルギー高効率給排気フードを計画した。未処理外気のエアカーテン効果により、調理環境の快適性を確保しつつ、外気負荷の低減を図った。ちゅう房フードはちゅう房機器の用途ごとに、ちゅう房機器の発停と連動した定风量（CAV）制御を行い、外気導入量の最適风量制御を行った。

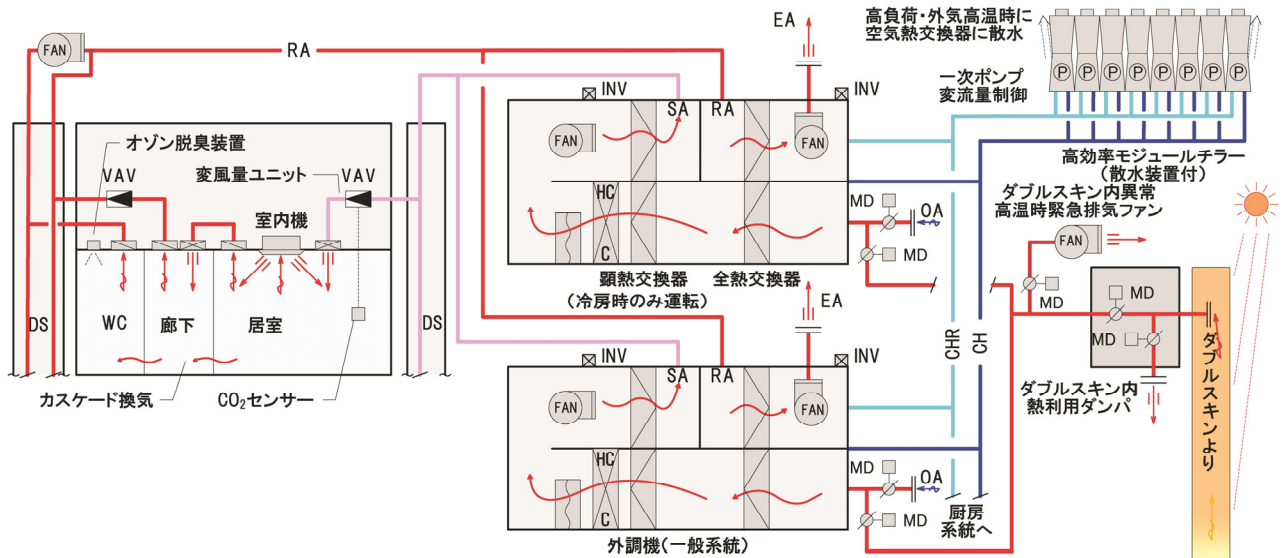


図 18 空調システム概念図

(2) 人検知センサによる最適照明制御

照明制御は人検知センサによる照明制御の他、昼光制御・照度一定制御を採用した。人検知センサによってリアルタイムに得た在席情報によって、照度を在エリアは適正照度で調光（700lx）、不在エリアは減光（200lx）に自動制御することで、快適性と省エネルギーの両立を図った（図 19、写真 2）。さらに不在エリアを通り抜けた場合は、直ぐには調光制御を行わない通り抜け制御を行うことで、頻繁な増光や減光の繰り返しを防ぎ、執務者への不快感の抑制を図っている。人検知センサによる「在」、「不在」情報を BEMS に取り込むことで、実運用に合った設備性能が適切に機能しているか検証可能な計画とした。

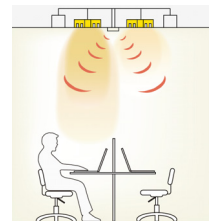


図 19 人検知センサ照明制御

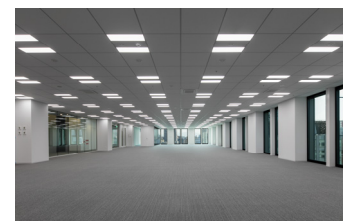


写真 2 執務室

4. 2 顕熱交換器を用いた再熱空調システムの構築

(1) 顕熱交換器による再熱空調システムの概要

図 20 に、顕熱交換器による再熱空調システム概念図を示す。外調機には全熱交換器の他に冷房時に過冷却除湿後の再熱用に顕熱交換器を設置した。一般に冷房時の過冷却除湿後には、吹き出し空気によるコールドドラフト防止のための再熱を行うことが多い。通常、再熱を行うための熱源やエネルギーが必要となるが、本計画では外調機の冷却コイル前後にまたがる部分に顕熱交換器を設置し、冷却コイル前と後で顕熱交換を行うことで

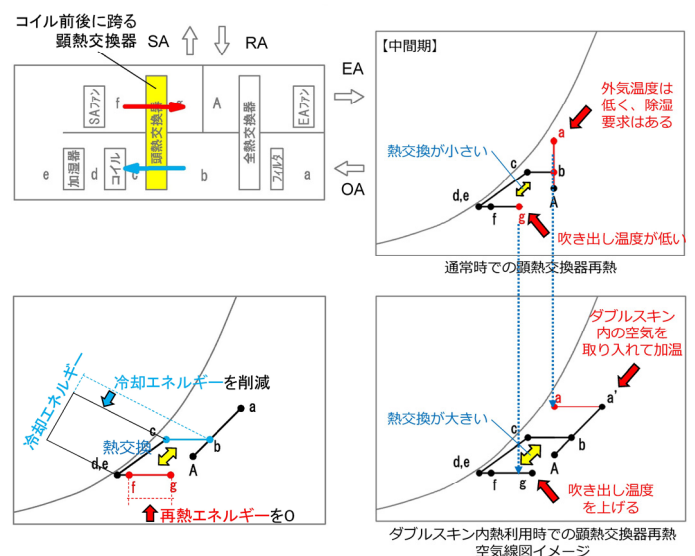


図 20 顕熱交換器による再熱空調システム概念図

除湿時におけるコイルでの冷却エネルギーを削減し、再熱エネルギーが不要なシステムを構築した。さらに中間期で外気温度が低く、除湿要求のある冷房時に、顕熱交換器による再熱を行っても熱交換量が小さく、吹出し温度が低くなる場合がある。そこで、ダブルスキン内の空気を少し取り入れて、外調機の入り口温度を加温することで、顕熱交換器での熱交換量を大きくして再熱し、吹出し温度を上げる制御を導入した。

(2) 顕熱・全熱交換器での省エネルギー効果

顕熱交換器による再熱空調システムの効果を検証するため、2020年7月18日～8月23日に外調機内の温湿度実測を行った。図21に、夏期(2020年8月4日)の全熱交換器前後の温度の経時変化を示す。外調機運転中の全熱交換器での効果は、時間帯によるバラつきは見られるものの平均熱交換効率は70%(平均RA/SOA風量比:0.78)で、外気温度の最も高い13時で約3.7℃(熱交換効率75%)の低減効果があった。図22に、同日の顕熱交換器前後の温度の経時変化を示す。外調機運転中の顕熱交換器での冷却および再熱効果は、時間によるバラつきは見られるものの約2～4℃であった。特に20時頃は冷却・再熱効果が大きく約8℃であった。図23に、昼間の全熱交換器でのエネルギー削減量を示す。実測期間中のエネルギー削減量の合計は、約444MJ/台であった。図24に、昼間の顕熱交換器での冷却と再熱によるエネルギー削減量を示す。実測期間中のエネルギー削減量の合計は、約143MJ/台であった。

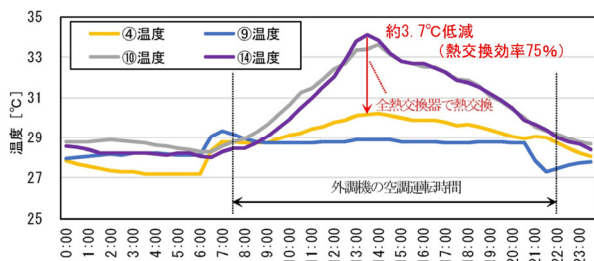


図21 夏期の全熱交換器前後の温度の経時変化

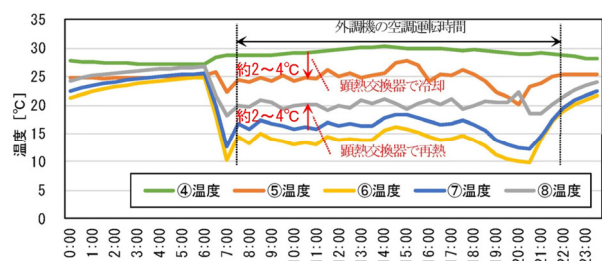


図22 夏期の顕熱交換器前後の温度の経時変化

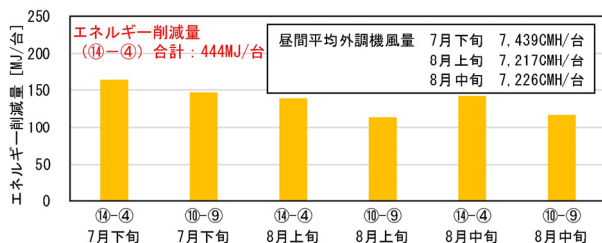


図23 昼間の全熱交換器でのエネルギー削減量

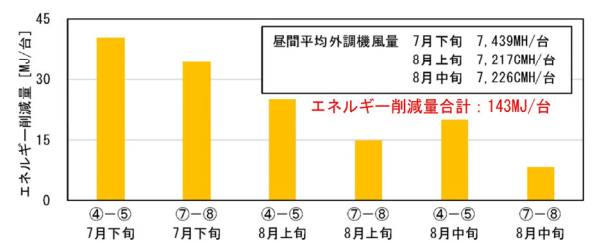


図24 昼間の顕熱交換器でのエネルギー削減量

5. 竣工後の運用での取り組み

5.1 都市型高層事務所ビルで ZEB Ready の実現

(1) 1次エネルギー消費量の計画値と実績値の比較

図25に、年間の1次エネルギー消費量の比較を示す。本建物は、1次エネルギー消費量を基準建物である1,142MJ/(年・㎡)から省エネルギーのみで60%以上削減の448MJ/年・㎡(BEST BEI=0.39(その他含まず、創エネルギー含む))とした計画を行った。竣工後1年間(2019年2月～2020年1月)での1次エネルギー消費量の実績値は、計画値から28%削減、基準値から72%削減の324MJ/年・㎡でZEB Readyを達成した。さらに2年目の2020年2月～2021年1月の実績値も、計画値の448MJ/年・㎡に対して17%減となった。照明設備のエネルギー消費量は、計画値124MJ/年・㎡に対して実績値は67MJ/年・㎡と特に小さく、計画値の54%の消費量となった。

図26に、月別用途別エネルギー消費(2020年)を示す。12月、1月において空調エネルギーが計画値を上回っているが、2020年は新型コロナ対策のため12月から換気風量を増加した影響と考えられる。換気風量を増加したことで外調機の送風動力と熱源である空冷チラーの消費電力が増大したと推察される。

図 27 に、用途別エネルギー消費量を示す。2020 年は 2019 年に比べて月後半の外気温が高く、空調熱源のエネルギー消費量の増加に影響したと推察される。2020 年は、ビルマルチ空調機の屋外機の電力消費量が特に大きくなっており、外気温温度による冷房負荷の増加、空冷ヒートポンプ効率への外気温温度による影響が要因と考えられる。

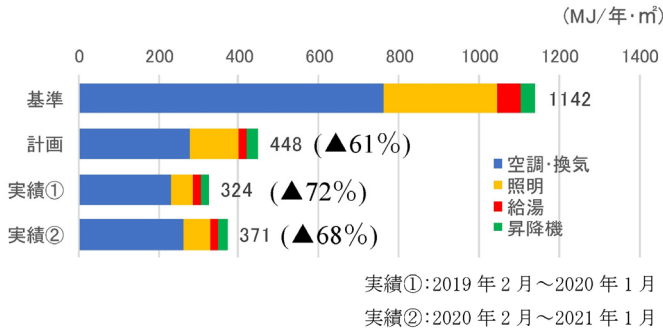


図 25 年間の 1 次エネルギー消費量の比較

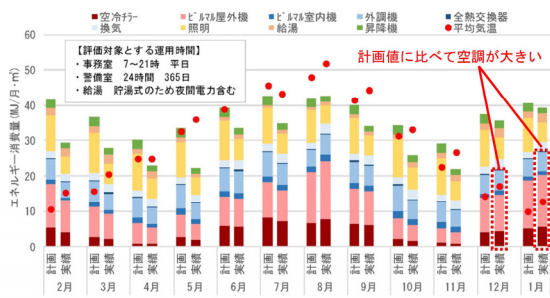
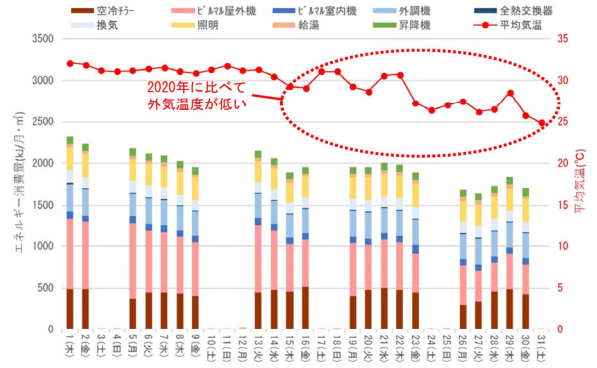
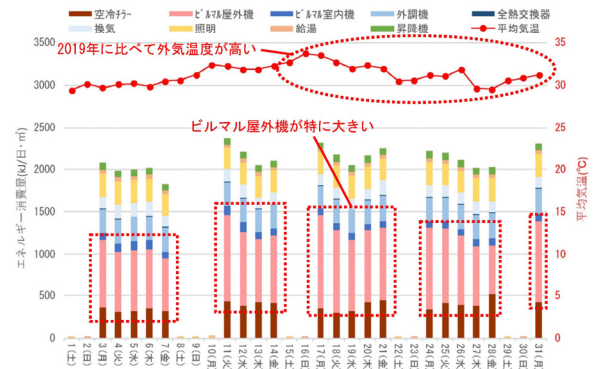


図 26 月別用途別エネルギー消費量 (2020年2月~2021年1月)



a) 2019年8月



b) 2020年8月

図 27 用途別エネルギー消費量

(2) ZEB 化 PDCA サイクルの実施

本計画では、入札時から設計、施工、運用時において一連のサイクルで ZEB 実現に取り組んだ (図 28)。まず入札時には、ZEB 化計画・評価ツールを用いて計画地の立地条件や建物形状から ZEB 化検討・提案を行った。次に基本設計・実施設計時には具体的な計画、導入技術を基に総合エネルギー消費量シミュレーションツール (BEST) にて詳細検討を行った。さらに施工段階には、機器・器具選定時や設計変更時に省エネルギー性能が低下しないように進めると共に、予め BEMS で省エネ技術毎に性能検証用グラフの作成等を行った。そして運用時には、BEMS データを用いてエネルギー監視を行い、運用改善を提案できる体制づくりを行った (図 29)。



図 28 ZEB 化 PDCA サイクル概念図

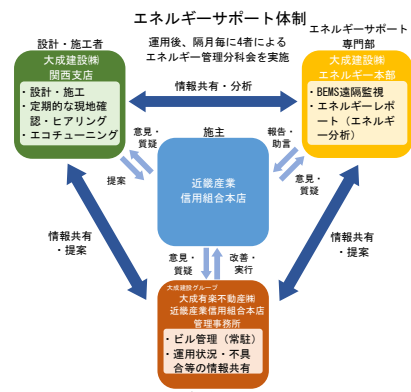


図 29 エネルギーサポート体制

5. 2 温熱環境などに関するアンケート調査

2021年4月に執務者に対しアンケートを実施（回答者数161名、アンケート回収率72%）したので結果の一例を紹介する。図30に、“空調環境に対する満足度”を示す。季節によりばらつきはあるが適当以上と回答した割合が7割以上と高かった。図31に、“夏期と冬期における室内温度の感じ方”を示す。夏期、冬期共に「適当」と回答した割合が過半数以上を占めていた。図32に、“夏期と冬期における室内湿度の感じ方”を示す。室内温度同様に夏期、冬期共に「適当」と回答した割合が過半数以上を占めていた。

居室の外気導入量はVAVおよびCO₂センサにより必要最小風量となるように最適制御をしているが、新型コロナウイルス感染症対策として、2020年12月から強制的に換気量を増やして運用をしている。図33に、2020年12月以降、“コロナ対策で換気量を増やしたことで業務に悪い影響があったか”を示す。90%以上の人が悪い影響はなかったと回答している。さらに図34に、“コロナ対策で換気量を増やしたことの感じ方”を示す。80%以上の人が「安心できる」「やや安心できる」と感じており、換気量の増強により一定の安心感が得られることが分かった。また、約20%の人は「省エネの観点からは不利ではあるが、やった方が良い」と回答しており、省エネ上、不利であっても感染症対策を優先した方が良いと感じていることが分かった。

5. 3 エコチューニングによるエネルギー消費量の改善

本計画では、計画段階から設計・施工を担当した当社の専門部によるエネルギーサポート業務が取り入れられており、遠隔でBEMSを閲覧、データ収集により、エネルギー消費実績の分析報告(エネルギーレポート)と運用改善検討(エコチューニング)を継続して行っている(1回/2ヶ月)(図35)。表3に、エコチューニングの実施内容(一例)を示す。

(1) セントラル給湯システム貯湯量の見直し

図36に、2019年4月～7月の月別の貯湯槽への補給水量、図37に、自然冷媒ヒートポンプ給湯機の消費電力量を各々示す。4月はグランドオープン前のため使用量(補給水量)は少なかったが、最大貯湯量が100%と高く、保温による消費電力が大きくなっていた。



図35 エネルギーレポート(抜粋)

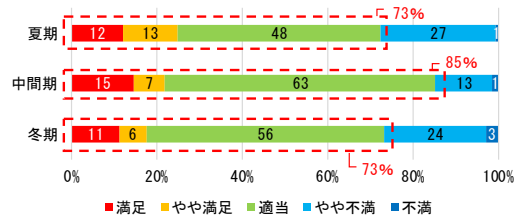


図30 空調環境に対する満足度

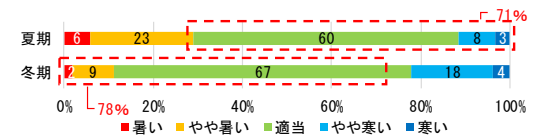


図31 夏期と冬期の室内温度の感じ方

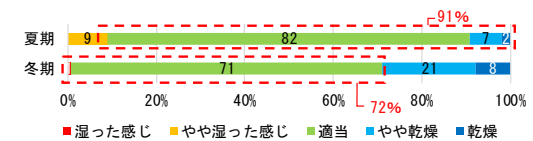


図32 夏期と冬期の室内湿度の感じ方

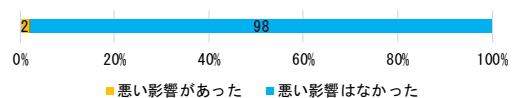


図33 コロナ対策で換気量を増加したことで業務に悪い影響があったか

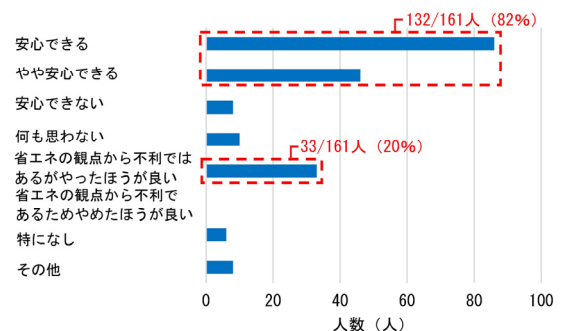


図34 コロナ対策で換気量を増やしたことの感じ方

表3 エコチューニングの実施内容(一例)

実施日	No.	種別	項目	実施内容		
1年目	2019年5月	1	給湯	セントラル給湯システムの貯湯量設定変更	・平日の最大貯湯量を90%に変更。 ・土日祝の最大貯湯量を40%に変更。	
		2	給湯	セントラル給湯システムの貯湯量設定変更	・平日の最大貯湯量を70%に変更。 (No.1設定後、数日後に更に変更。)	
	2019年6月	3	衛生器具	トイレ便座温度調整	・温水洗浄便座の便座、洗浄水の温度設定を「高」→「低」に変更。	
		4	衛生器具	トイレ便座節電設定	・温水洗浄便座を節電モードに設定(役員室以外)。使用のない時間帯は便座と洗浄水のヒーターを停止。	
		5	給湯	セントラル給湯システムの貯湯量設定変更	・平日の最大貯湯量を60%に変更。	
	2019年7月	6	照明	食堂の照明減光スケジュール設定	・食堂の照明スケジュールを設定。 ・15時以降は50%の照度に設定。	
		7	換気	喫煙対応室用局所排気ファンの夜間切り忘れ対策	・常駐警備員へ夜間巡回時に在室者が不在で運転している場合は停止するように依頼。	
	2019年10月	8	空調熱源	中間期における空冷HPチラー(外調機熱源)の運転開始時刻の変更	・10月の外気温度は比較的低いため、通期で4時30分からのチラー運転を中間期は6時30分からに変更。	
		9	空調熱源	中間期における空冷HPチラー(外調機熱源)の冷水温度の緩和	・冷房負荷の少ない中間期においては冷水設定温度を緩和し、空冷HPチラー消費電力の削減を図る。(冷水出口温度7~9°Cに変更)	
	2年目	2020年6月	10	空調熱源	ダブルスキン内強制排気ファン運転温度の変更	・ダブルスキン内温度50°C以上で運転から43°C以上で運転に変更
		2020年12月	11	換気	新型コロナウイルス対策で換気量を増加	・VAV制御のCO2濃度設定値を800ppmから600ppmに変更

5月より6月にかけて、段階的に最大貯湯量の割合を60%に下げることによって、外気温の影響もあるが、消費電力を約25%削減することができた。

(2) 中間期の空冷HPチラー冷水温度見直し

図38に、空冷HP PACと空冷HPチラーの消費電力の比較を示す。空冷HP PACの消費電力はエコチューニング前後で変動がないのに対し、空冷HPチラーは、エコチューニング後は送水温度設定を上げることで、エコチューニング前に比べて、空冷HPチラーの消費電力は減少傾向にあった。

(3) 新型コロナ対策で換気量を増加

図39に、在所率、図40に、空調・換気電力消費量を示す。1回目の緊急事態宣言に合わせて大きく在所率が低下したが、建屋全体としては、その後は若干在所率が下がった

が、大きな変動は見られなかった。これは都市インフラとしての役割を担う金融機関の性質上、出勤率を下げられなかったためである。特に、営業部門の在所率が高かったため、宣言後には執務者を他階へ移動し分散することで、在所率を約20%低減し、密集するエリアができないように対策を行った。2020年12月に新型コロナ対策で換気量を増加したため、12月中旬から外調機の送風量が1割程度増加し、それに合わせて空調・換気電力消費量も増加傾向にあった。

6. まとめ

近畿産業信用組合本店は、都市部での高層事務所ビルにおいて、各種の省エネルギー技術を積み重ねることでZEB Readyを実現した。外装をダブルスキンとすることで断熱性向上や設備機能を付加すると共に、意匠性を高め、街並みへの景観調和の両立を図った。竣工から2年間が経過し、計画から竣工、運用の全ての段階の全てにおいてZEB Readyを達成した。予期せぬ新型コロナによる換気量の増加など運用の変化はあったが、運用段階でのエコチューニングの効果も含め、設計性能を発揮することができた。都市部の高層事務所ビルや金融機関の本店として、ZEBの普及における1つのモデルケースとなると実感している。引き続き、2050年カーボンニュートラル、持続可能な脱炭素社会の実現に向け情報発信を行い貢献していきたいと考えている。

<参考文献>

- 1) 永吉敬行、湯浅孝：都市部における高層事務所ビルのZEB化に関する研究（第1報）建物・設備概要および竣工後1年間のエネルギー消費の実績値、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、2020.9
- 2) 永吉敬行、湯浅孝、富田峻亮：都市部における高層事務所ビルのZEB化に関する研究（第2報）ダブルスキン内熱の空調利用と顕熱交換器の再熱利用による省エネルギー効果、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、2021.9
- 3) 富田峻亮、湯浅孝、永吉敬行：都市部における高層事務所ビルのZEB化に関する研究（第3報）竣工後2年間におけるエネルギー消費実績分析、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、2021.9

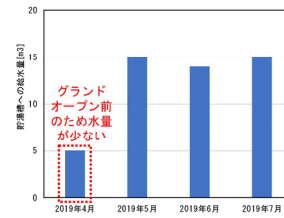


図36 月別の貯湯槽への補給水量

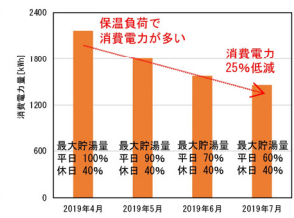
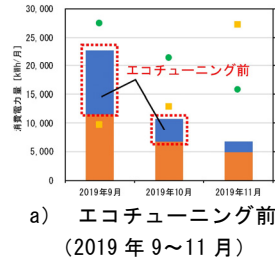
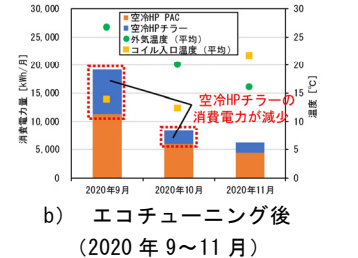


図37 自然冷媒ヒートポンプ給湯機の消費電力量

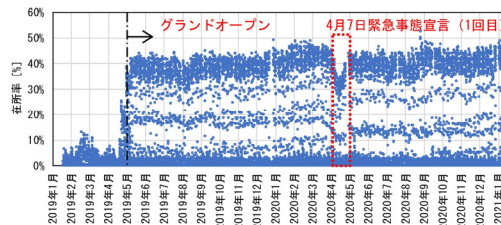


a) エコチューニング前 (2019年9~11月)

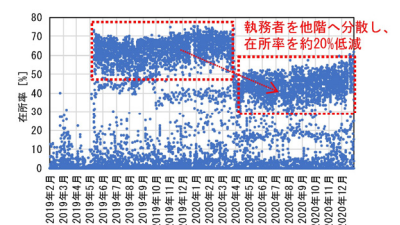


b) エコチューニング後 (2020年9~11月)

図38 空冷HP PACと空冷HPチラーの消費電力の比較



a) 建屋全体



b) 執務室 営業部門

図39 在所率

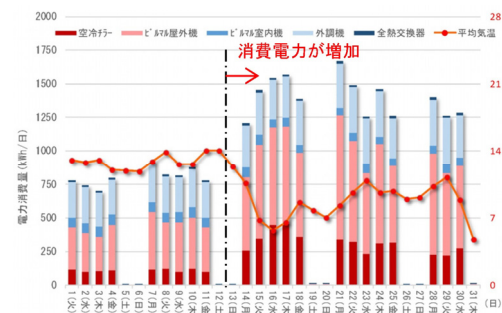


図40 空調・換気電力消費量 (2020年12月)