

たばこ用脱臭装置とセンシング技術を用いた 省エネルギー喫煙室の開発

第1報——換気量削減の施策と省エネルギー効果の検証

中 川 貴 文*¹ 増 田 大 祐*²
小 林 徳 和*² 佐 伯 寅 彦*²
坂 本 裕*² 穴 井 俊 博*²
湯 懐 鵬*²

喫煙室内の臭気を軽度に保つには換気量を大きくする必要があるが、空調負荷が大きくなる。喫煙室内の空気環境の維持にかかるエネルギーを抑制するため、(1) たばこ用脱臭装置の導入による換気量低減、(2) 外気条件により換気と脱臭装置の比率を切り替える風量比可変制御、(3) 画像解析型人感センサでの在室者人数検知による風量制御、(4) 空気汚れセンサによるフィードバック制御、(5) 室下部から給気し天井面から排気する置換換気を組み合わせた喫煙室システムを開発した。本システムを導入した喫煙室で1週間の実運用データを基に省エネルギー効果を検証すると、空調と搬送動力に必要な一次エネルギーをいずれも年間約60%削減できる試算結果となった。

はじめに

2020年4月に全面施行された改正健康増進法により、望まない受動喫煙を防止するため多数の者が利用する施設では原則屋内禁煙となった。屋内に喫煙室を設置する場合には、喫煙室からのたばこ煙の漏えいを防ぐため、扉を開放した際の開口面において喫煙室内に向かう気流が0.2 m/s以上であること等の技術的基準を満たす必要がある。

喫煙室の換気空調計画にあたっては開口面での気流確保に加え、厚生労働省が2003年に策定したガイドライン¹⁾で浮遊粉じん濃度(0.15 mg/m³以下)および一酸化炭素濃度(10 ppm以下)が示されて空気環境の改善方法について多くの研究が行われたが^{2)~4)}、エネルギー消費量に関する報告は見受けられない。また、坂口ら⁴⁾の解析では粉じん濃度の基準値を満足させても臭気に関しては認知閾値濃度以上になることがほとんどである。さらに近年では受動喫煙に加え、喫煙者の衣類などに付着した有害物質に非喫煙者が曝露される三次喫煙による健康被害が懸念されている⁵⁾。また、萬羽ら⁶⁾によれば、防

汚加工をした壁紙であっても拭き取りをしない場合は臭気が付着し、三次喫煙の原因にもなりうる。これらを防止するためにも、粉じん濃度と一酸化炭素濃度だけでなく、臭気を軽度に保つことが望ましい。

換気により臭気を軽減する場合の設計例として、建築設備設計基準⁷⁾には喫煙臭を軽度に保つための必要換気量の算出方法が以下の式で示されている。

$$Q = \frac{W}{S} \quad \dots\dots(1)$$

$$W = n \cdot A \cdot L \cdot N \quad \dots\dots(2)$$

ここに、

Q : 必要換気量 [m³/h]

W : 喫煙量 [mg/h]

S : 喫煙臭を軽度に保つためのたばこ燃焼量 / 換気量 (=35.3) [mg/m³]

n : 人員密度 (=0.2~1) [人/m²]

A : 喫煙スペースの床面積 [m²]

L : たばこ1本当たりの燃焼量 (=700) [mg/本]

N : 喫煙者1人換算時の1時間当たりの喫煙本数 (=12) [本/(h・人)]

*¹ (株)三菱地所設計

*² 新菱冷熱工業(株)

この式にしたがって必要換気量を計画すると換気回数は概ね 30~60 回/h 程度になり、多くの空調エネルギーが必要となる。しかし、一般的な天井吹出し・天井吸込みの空調システムでは約 57 回/h の換気回数を確保している喫煙室にも関わらず平均粉じん濃度が 0.56 mg/m^3 となった事例もある⁸⁾ ため、換気量の確保に加えて効率のよい換気システムの導入^{3), 8)} や、粉じんや臭気の除去が必要である。

筆者らはたばこ用脱臭装置による臭気の除去と、置換換気による煙の拡散防止、喫煙状況や外気の状態に応じた換気量制御から構成される喫煙室システムを開発した。また、本システムを実際のオフィスビルに導入し、脱臭装置による臭気等の除去性能と喫煙室内の空気環境の測定、利用者へのアンケート調査による臭気の強さの評価、ならびに省エネルギー効果の検証を行った。本報では喫煙室システムの概要、年間一次エネルギー消費量および換気量削減による省エネルギー効果について報告する。また、第 2 報で置換換気方式の詳細、脱臭装置の臭気濃度除去率が目標とする 90% 以上であったこと、空気環境の測定結果とアンケート結果が概ね良好であったことを報告する。

1. 空調換気システム概要

本喫煙室はシステム検討および予備試験を経て、2018 年 1 月に大手町にあるオフィスビルの喫煙室に導入した。図-1 に喫煙室の平面図を示す。

喫煙室は前室と喫煙エリアで構成され、喫煙エリア部分は床面積約 41 m^2 、天井高さ $2,600 \text{ mm}^H$ 、室容積約 107 m^3 である。前室と喫煙エリアの間の出入口は全開時の有効開口 $900^W \times 2,505^H \text{ mm}$ の引戸とし、扉の開度を変えても面風速の大きな変化がないよう、戸袋部は全面山型ガラリとした (図-2)。ピーク時の最大喫煙者数は 25 名と想定し、(1)式にしたがって設計上の必要換気量は $6,000 \text{ m}^3/\text{h}$ (約 56 回/h) とした。図-3 に本喫煙室の空調換気システムフローを示す。排気ファンと外気処理空調機による実換気量は $2,800 \sim 5,400 \text{ m}^3/\text{h}$ の可変風量とし、実換気量を補うためたばこ用脱臭装置の設置による循環換気、状況に合わせて換気量を適切にするための画像解析型人感センサによるフィードフォワード風量制御ならびに空気汚れセンサによるフィードバック補正制御、外気条件による風量比制御を採用した。また、喫煙室では垂直方向のピストンフローを形成する置換換気により喫煙後の汚染物質除去効率を向上できることが知られているため³⁾、本計画では床面近くから給気し天井面から排気することで垂直方向に気流を形成し、臭気や有害物質を含む

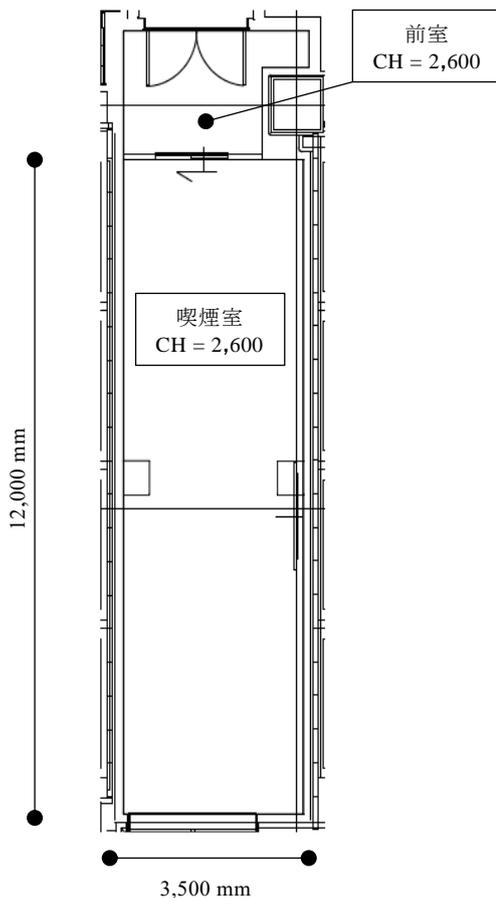


図-1 喫煙室の平面図

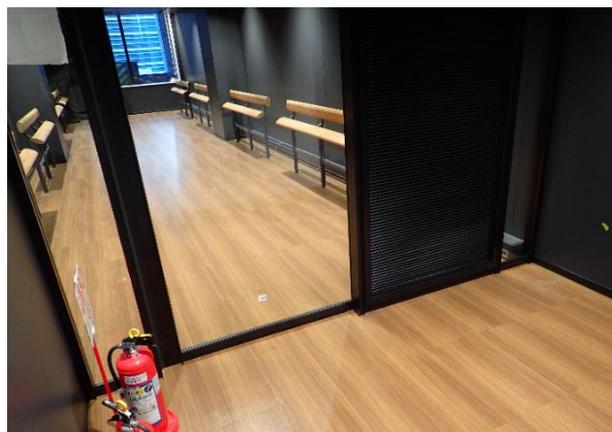


図-2 喫煙室の引き戸および戸袋ガラリ

空気の拡散を抑え効率良く煙を排出する置換換気方式を採用した。なお、喫煙室からのたばこ煙の漏えいを防ぐため、運転条件によらず実換気量のうち $2,100 \text{ m}^3/\text{h}$ は前室から喫煙室内に供給し、開口面から喫煙室内に向かう 0.2 m/s 以上の気流を確保した。

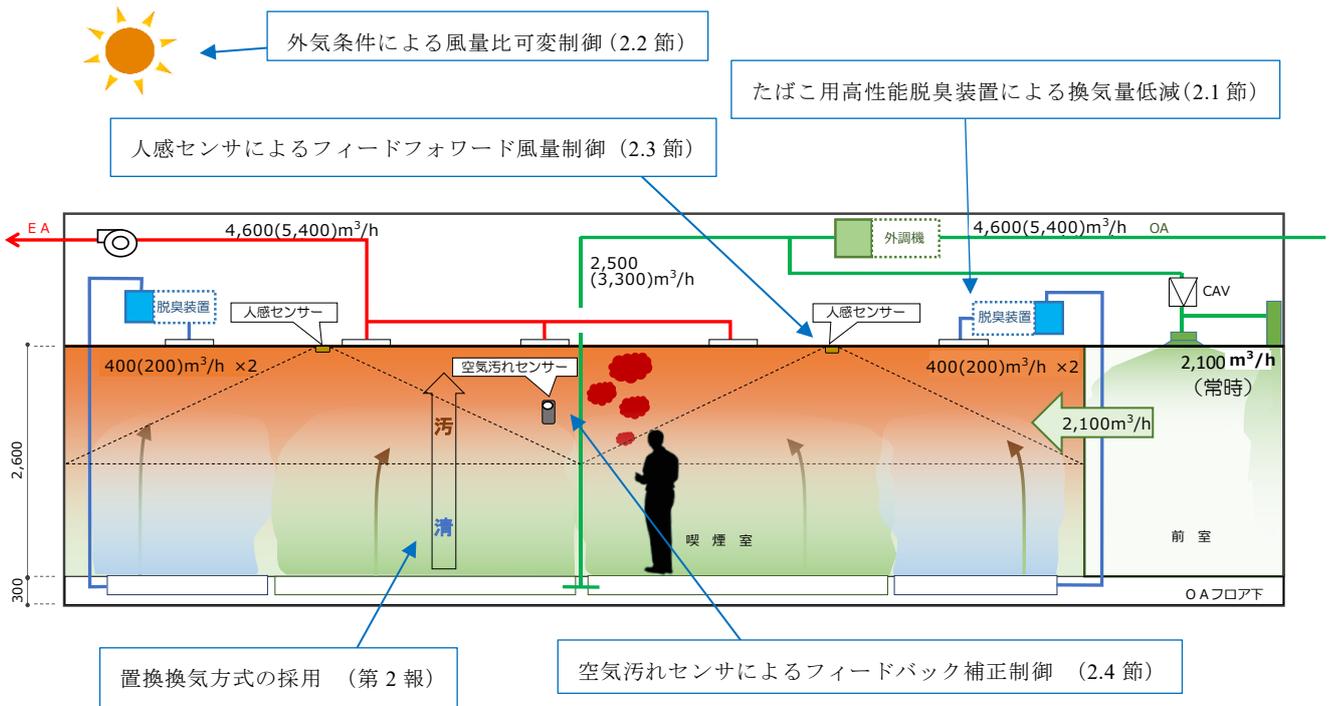


図-3 喫煙室の空調換気システムフロー

2. 換気量削減の施策

2.1 たばこ用脱臭装置の導入による換気量低減

喫煙室の換気量の計画にあたっては、開口部での流入風速 0.2 m/s 以上を確保するための風量と、式(1)のように臭気軽減のために必要な風量があるが、喫煙室が大きい場合は臭気軽減のために必要な換気量はたばこ煙の漏えいを防ぐための換気量と比較して大きくなる。したがって、換気以外の方法で臭気を除去できれば、換気量を削減し空調負荷を軽減することが可能になる。

たばこ煙には多くのガス状物質が含まれるが、たばこの銘柄に関わらずホルムアルデヒド、アセトアルデヒドの濃度が高いことが特徴である。とくにアセトアルデヒドは嗅覚閾値も低く微量でも臭いを感じるため、たばこ臭の軽減にはアセトアルデヒドの除去が重要である⁹⁾。一般に脱臭目的で使用される通常の活性炭はトルエンなど沸点の高い物質ほど吸着性が高く、アセトアルデヒドのような沸点の低い物質は除去しにくいことで知られている¹⁰⁾。佐伯ら¹¹⁾はアセトアルデヒドおよびホルムアルデヒドの吸着能力を高めるために、活性炭の物理吸着機能に化学吸着機能を付加し、吸着した化学物質が再放出されにくい添着活性炭(以下、特殊活性炭)を開発し、その特殊活性炭を組み込んだフィルターに、浮遊粉じんを除去する HEPA フィルターを併用したたばこ用脱臭装置を開発した。本計画ではこの特殊活性炭を用いたたばこ臭の臭気濃度を 90% 除去可能なたばこ用脱臭装置

(定格風量 400 m³/h) を製作し、本脱臭装置の風量に 0.9 を乗じた相当換気量を臭気除去に必要な換気量の一部として代替した。

2.2 外気条件による風量比可変制御

脱臭装置で臭気を除去し外気導入量を小さくすることで空調負荷を低減する効果は、盛夏・厳寒期はとくに大きくなる。一方、脱臭装置での処理風量を大きくすると特殊活性炭フィルターおよび HEPA フィルターの寿命に影響し、フィルターの交換頻度が高くなる。そこで、中間期は換気の比率を増やして特殊活性炭フィルターおよび HEPA フィルター等の延命を図る換気優先モードとし、盛夏・厳冬期は脱臭装置処理風量の比率を増やすことで空調負荷を低減する脱臭装置優先モードとした。換気優

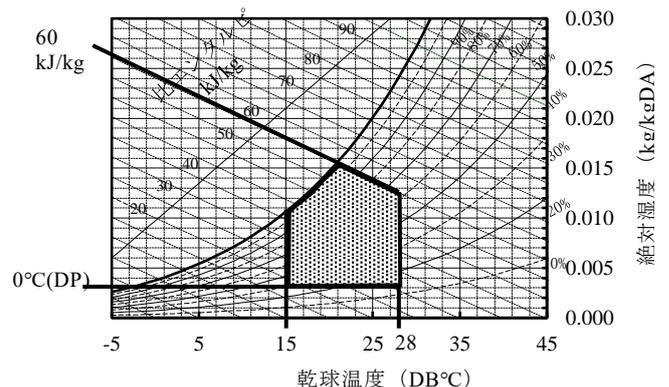


図-4 換気優先モード有効範囲(網掛け部)

先モード有効条件は、外気温度 15～28℃、外気エンタルピー 60 kJ/kg 以下、かつ外気露点温度が 0℃ (DP)以上と設定した (図-4)。

2.3 画像解析型人感センサによるフィードフォワード風量制御

喫煙室の在室人数 (喫煙者数) を検知するため、喫煙室天井面に画像解析型人感センサ (HVC-F/オムロン(株)製) を設置した。このセンサはサーモパイル型のグリッド単位で在室者の有無を検知するのではなく、画像で人を判断・検知することができるため、喫煙室のように一定の範囲に人が密集している場合でもある程度正確に在室人数を検知することが可能である。

人感センサの検出人数を基に、脱臭装置優先モード・換気優先モードの風量をそれぞれ図-5 および図-6 のとおり設定した。

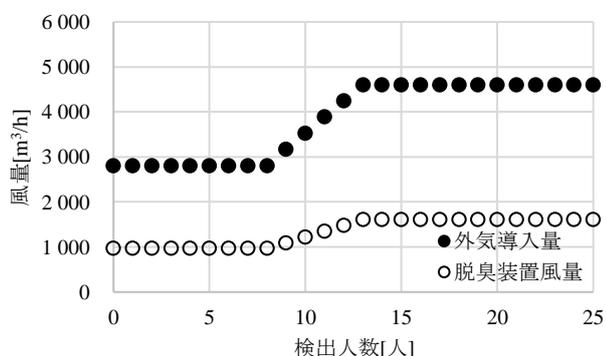


図-5 脱臭装置優先モードでの設定風

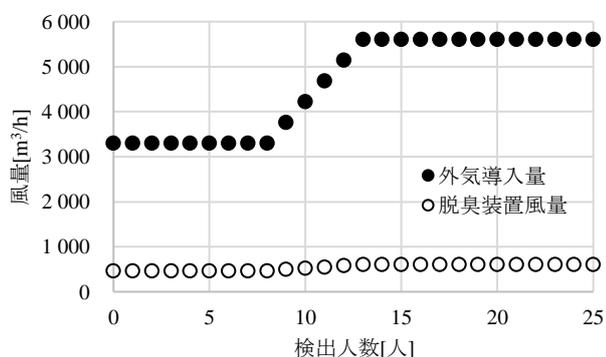


図-6 換気優先モードでの設定風量

2.4 空気汚れセンサによるフィードバック補正制御

特殊活性炭フィルターの破過により所定の臭気除去性能が得られなくなっている場合や、喫煙者数と関連しない臭気発生要因 (たばこ消し忘れ等) がある場合を想定し、室内に設置した空気汚れセンサ (COD-203/新コスモス電機(株)製) の検知設定値を超えると、換気と循環風量を一定時間増量するフィードバック制御を取り入れた。

このセンサは熱線型半導体式で、金属酸化物半導体の表面に物質が吸着する際に生じる抵抗値の変化から空気の汚れ度合いを検出する。

3. 年間一次エネルギー消費量の比較算出

本喫煙室の省エネルギー効果を検証するため、2018年3月5日～3月11日の1週間、人感センサによる検出人数と、外気導入量および脱臭装置風量データを記録して喫煙室使用状況の傾向を分析し、年間一次エネルギー消費量を試算した。喫煙室内の温湿度条件およびその他の計算条件を表-1に示す。冷房および暖房にかかる一次エネルギー消費量は換気風量と外気条件による必要処理熱量から、搬送動力については換気風量・静圧・全圧効率から消費電力量を算出した。また、比較対象として一般的な全外気による常時定量換気方式の喫煙室を想定し、平日 8:00～20:00 を最大喫煙者数 (25 名) に基づく設計換気風量 (6,000 m³/h) で運用する場合の一次エネルギー消費量を求め比較した。

表-1 計算条件

		本喫煙室	常時定量換気方式
室内温湿度	6～9月	25℃、50%RH	
	1～5月 10～12月	22℃、40%RH	
外気温湿度		東京都 2016 年月毎時刻別平均値 (気象庁 過去の気象データ ¹²⁾)	
換気風量		代表日における 8:00～20:00 の検出人数の測定結果より、図-5 と図-6 の設定風量より算出。20 時～翌 8 時:0 人検出時の換気量	平日 8:00～20:00 : 6,000 m³/h それ以外 : 0 m³/h
ダクト静圧	給気系統	1,000 Pa	
	排気系統	300 Pa	
	脱臭装置系統	300 Pa	なし
全圧効率		60%	
一次エネルギー換算係数	冷熱	0.96 kJ/kJ	
	温熱	1.42 kJ/kJ	
	電力	9.76 kJ/kJ	

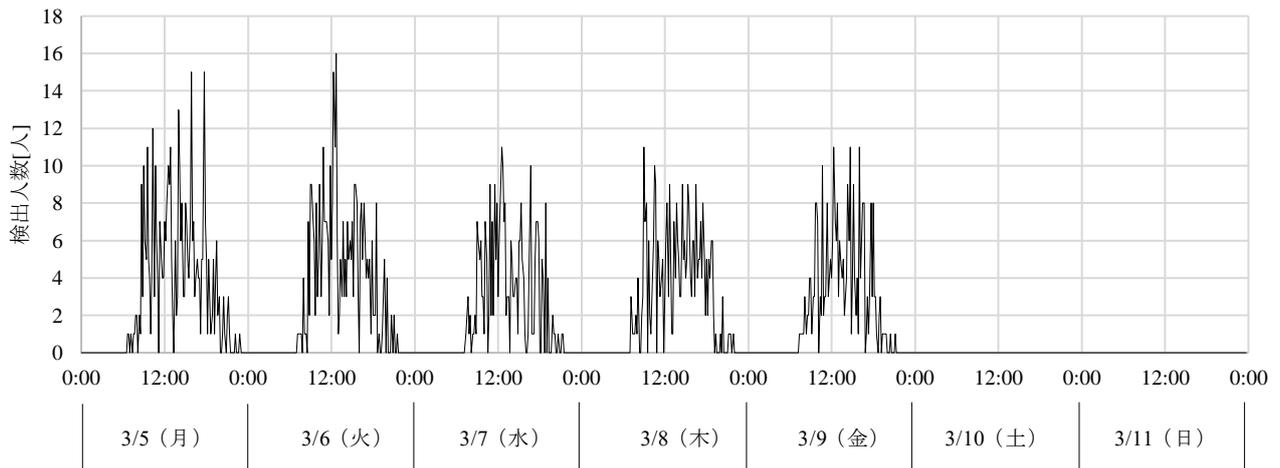


図-7 人感センサによる検出人数の推移

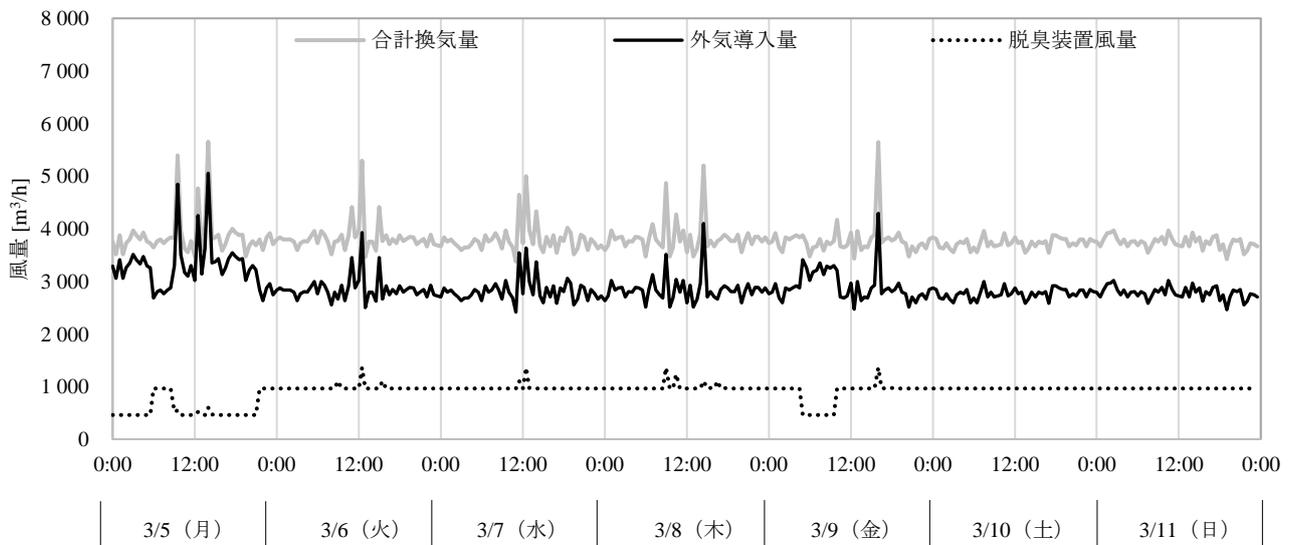


図-8 外気導入量と脱臭装置風量、合計換気量の推移

4. 結果と考察

4.1 検出人数と換気風量、脱臭装置風量の実績

期間中の検出人数の推移を図-7に示す。平日に当たる3月5日から3月9日にかけては7時ごろから検出がはじまり、9時から18時ごろまでは増減を伴いながら複数回のピークを迎え、20時以降はほとんど検出されない傾向がみられた。土曜日と日曜日にあたる3月10日と3月11日は検出されず、休日はほとんど使用されなかった。設計時の最大想定喫煙者数25人に対し、期間中の最大検出人数は3月6日の12時40分に記録した16人であった。

図-8に外気導入量と脱臭装置風量、およびその和より求めた合計換気量の推移を示す。外気導入量・脱臭装置風量とも検出人数のピークに追従して増減しており、画像解析型人感センサによるフィードフォワード制御が機

能していることが確認できた。また、脱臭装置風量はほとんどの期間で脱臭装置優先モードの最小風量である960 m³/h以上となったが、3月5日および3月9日の一部の時間帯では960 m³/hを下回り、代わりに外気導入量が増加していることから、外気条件によるモードの切り替えが機能していることが確認できた。空気汚れセンサによるフィードバック補正制御は行われなかったが、これは検出した喫煙者数に応じて適切な換気制御が行われ、かつ特殊活性炭フィルターが十分な除去性能を保っていたためと考えられる。

4.2 省エネルギー効果の試算

平日の喫煙者として期間中に最大の検出人数を記録した3月6日の8時～20時の検出人数データを用い、20時～翌8時および土日の喫煙者数は終日0人として年間一

次エネルギー消費量を試算した。図-9に全外気による常時定量換気方式と本喫煙室システムの年間一次エネルギー消費量の試算結果を示す。冷房、暖房、搬送動力のいずれの項目においても一次エネルギー消費量を約60%低減できる試算結果となった。

本システムでは2章で示した外気導入量を低減する施策が有効であったほか、喫煙人数が設計時の25人と比較して実績データでは最大16人と少なかった。設計時に喫煙者数を正確に推定するのが望ましいが、計画・設計時の想定と実際の運用段階で条件が異なることは一般の設備計画や設計などでも散見される。今回開発した制御システムのように、リアルタイムセンシングにより設備機器の運転を制御することで、実際の利用状況に相応した省エネルギー効果をもたらすことができる。

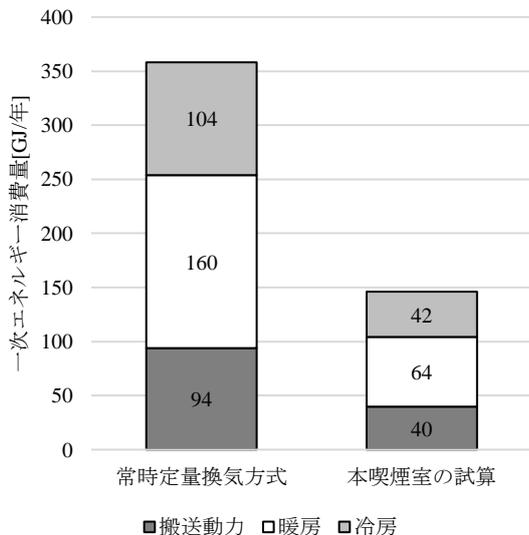


図-9 一般的な常時定量換気方式と本喫煙室システムの年間一次エネルギー消費量試算結果

おわりに

喫煙臭を軽度にも保ちながら外気導入量を削減するため、たばこ用脱臭装置による換気の代替、外気条件に合わせて外気導入量と脱臭装置風量の比率を切り替える制御、検知された喫煙者数や空気汚れに応じた風量制御および置換換気方式を備えた喫煙室システムを開発し、年間一次エネルギー消費量について検証を行った。

実運用時の代表日の喫煙者数データを用いて本システムで冷房、暖房および搬送動力の年間消費一次エネルギーを試算した結果、最大喫煙者数に対応する換気を全外気により平日昼間に常時行う方式と比較して、いずれも約60%の削減がみられた。本システムのように外気導入の一部を脱臭装置により代替し、さらに実際の喫煙状況

に応じた最適制御を行うことで、たばこ臭を軽度に保つ室内環境と省エネルギーを両立する喫煙室の計画・運用が期待される。

謝 辞

当システムの計画、設計、施工、解析においては三菱地所株式会社の森博氏にご指導ならびにご協力賜りました。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 厚生労働省, 職場における喫煙対策のためのガイドライン <<https://www.mhlw.go.jp/houdou/2003/05/h0509-2a.html>> (参照年月日 2021年4月1日)
- 2) 並木則和, 山田哲也, 宇田貴裕, 鍵直樹: 低境界風速条件における空間分煙効果に関する研究, 空気調和・衛生工学会論文集, No.204(2014), pp.93-99
- 3) 橋本幸博, 高橋秀典: 喫煙室の換気効率に関する研究, その1 置換換気と混合換気による実験結果の検討, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集(2013), pp.193-196
- 4) 坂口淳, 赤林伸一, 鍛冶紘子, 都丸恵理: レストランにおける受動喫煙に関する基礎的研究, 日本建築学会環境系論文集, 74-635(2009), pp.39-45
- 5) 野口美由貴, 鈴木義浩, 山崎章弘: サードハンドスモークもう一つの喫煙環境問題-, 室内環境, 21-1(2018), pp.51-60
- 6) 萬羽郁子, 棚村壽三, 柴田吉見, 長谷博子, 都築和代, 光田恵: 内装材へのたばこ付着臭の経時変動, 第39回人間-生活環境系シンポジウム(2015), P-1
- 7) 社団法人 公共建築協会 (編): 建築設備設計基準 平成30年版(2018), pp.535-536
- 8) 遠藤智行, 倉淵隆: 高効率換気システムの導入による喫煙室内空気質環境の改善に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 83-745(2018), pp.285-292
- 9) 野口美由貴, 水越厚史, 前田康博, 佐伯寅彦, 湯懐鵬, 柳沢幸雄: 湿式法を用いた空気清浄装置のたばこ煙および臭気除去性能評価(第1報). 室内環境, 15-2(2012), pp.125-134
- 10) 阿部郁夫: 活性炭の基礎知識. 生活衛生, 37-4(1993), pp.163-170
- 11) 佐伯寅彦, 小林徳和, 岩間裕樹, 穴井俊博, 湯懐鵬, 津島健: 喫煙室向け乾式脱臭装置の開発と性能評価. 室内環境学会口頭発表抄録(2017), pp.56-57
- 12) 気象庁, 過去の気象データ・ダウンロード <<http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>> (参照年月日 2021年4月1日)

Development of Energy-saving Smoking Room Equipped with Cigarette Smoke Deodorizer (Part 1) Methods for Ventilation Reduction and Evaluation of Energy Saving Effect

by Takafumi NAKAGAWA ^{*1}, Daisuke MASUDA ^{*2}, Norikazu KOBAYASHI ^{*2}, Torahiko SAEKI ^{*2},
Yu SAKAMOTO ^{*2}, Toshihiro ANAI ^{*2} and Huaipeng TANG ^{*2}

Synopsis : To maintain an acceptable level of indoor air quality, a large volume of ventilation is required in smoking rooms, which increases the air conditioning load. In order to improve air quality and achieve energy saving, we have developed a smoking room system equipped with the following features: (1) deodorizing devices that reduce ventilation volume, (2) ventilation volume ratio

control based on outside air conditions, (3) variable ventilation control with headcount sensors, (4) feedback control from air quality monitors, and (5) displacement ventilation that forms an air flow from the floor to the ceiling. The results of a one-week field test showed the annual primary energy consumption required for air conditioning and transporting air was reduced by about 60%.

^{*1} Mitsubishi Jisho Design Inc.

^{*2} Shinryo Corporation