

出・保存した。持ち帰った試料はボルテック スミキサーで 60 秒間攪拌した後、ゼラチンフ ィルタは蒸留水（注射用水、エンドトキシン フリー）で更に 100 倍希釈、MCE フィルタは 更に 10 倍希釈し、分析に用いた。

分析装置として Toxinometer ET-5000（和光 純薬）を用いた。ライセート（LAL）試薬と 反応させたエンドトキシンのゲル化に伴う濁 度変化をカイネティック比濁法で測定し、検 量線に基づいて定量する。透過光量比を計測 し測定開始から設定閾値（94.9%）に達する までの時間（T_g：ゲル化時間）でエンドトキ シン濃度が決定される。日本薬局方及び FDA 認証分析法にはゲル化法・比濁法・比色法の 3 つがあるが吸光比濁法は精度が高く定量し やすい利点があり、1~0.001EU/mL の広範 囲・高感度で検出できるため環境中汚染程度 を測定するのに適合している。定量のために、 1.0, 1/8, 1/64, 1/512(=0.00195)EU/mL の 4 段 階の濃度標準を用いて検量線を作成した。

濃度単位としては、「EU/mL」：検出濃度、 「EU/g」：ダスト単位重量当たり濃度、 「EU/m³」：空気単位容積当たり濃度を用いる。 EU は Endotoxin Unit（エンドトキシン活性値） のことである。

（倫理面での配慮）

本研究のアンケート調査は、国立保健医療 科学院研究倫理審査委員会の承認（承認番号 NIPH-IBRA#12077, 平成 26 年 10 月 16 日承認）を得て実施している。

C. 研究結果及び考察

C.1 建築物利用者の職場環境と健康に関する 実態調査（縦断調査）

東京都と大阪市に所在する事務用途の特 定建築物を対象に、東京都と大阪市の協力 のもと、大阪市 1543 施設、東京都 1582 施設 の調査依頼を行った。その結果、東京都 5 件、 大阪市 6 件の事務所から実態調査（調査フロ アー数 24, 調査対象者数約 651 名）の協力を 得た。平成 27 年 6 月から順次、アンケート調 査と室内環境の実測調査を計画通りに実施中 である。

C.2 建築物における実測調査

C.2.1 温湿度・CO₂濃度結果

図 2-1-1~図 2-1-24 に各建物の 2015 年 11 月 10 日~11 月 24 日の 2 週間の温湿度・CO₂濃度 の経時変化を示す。図中の囲みは建築物環境 衛生管理基準値を示している。

図 2-1-1~図 2-1-3 の T5 の経時変化において、 CO₂濃度と温度は管理基準値を満足している もの、相対湿度においては管理基準値である 40%を下回る日が見受けられた。この建物 では自然換気を取り入れており、また CO₂濃 度が設定された上限濃度に達すると自動で外 気を取り入れる CO₂制御を行い、基準値を満 足させている。階別による差は見られなかつ た。他のほとんどの建物で CO₂濃度と温度は 管理基準値を満足していたが、相対湿度の関 しては、管理基準値である 40%を下回る結果 が多くみられた。この結果からも冬期の低湿 度問題が浮き彫りとなった。

近年省エネの意識がますます高まり、CO₂ 濃度制御を取り入れる建物が多く見られた。 しかし、例えば、前述した T5 ビルにおいては、 昼頃に室内 CO₂濃度が設定濃度に達し、 外気量を多く導入したため、室内 CO₂濃度が 下がりつつあった。本来なら、取り入れ外気 量を、室内 CO₂濃度が設定濃度を超えないと ころで制御した方がより省エネが図られるが、 取り入れ外気側のダンパがずっと開いたため、 昼過ぎの省エネ効果が得られなかった。CO₂ 濃度制御について、ボリュームダンパ（VD） による自動制御の導入などが望まれる。

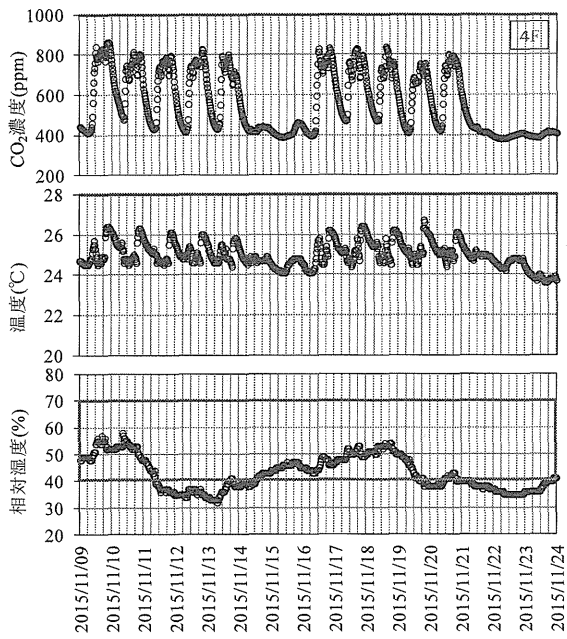


図 2-1-1 T5 (4F) 経時変化

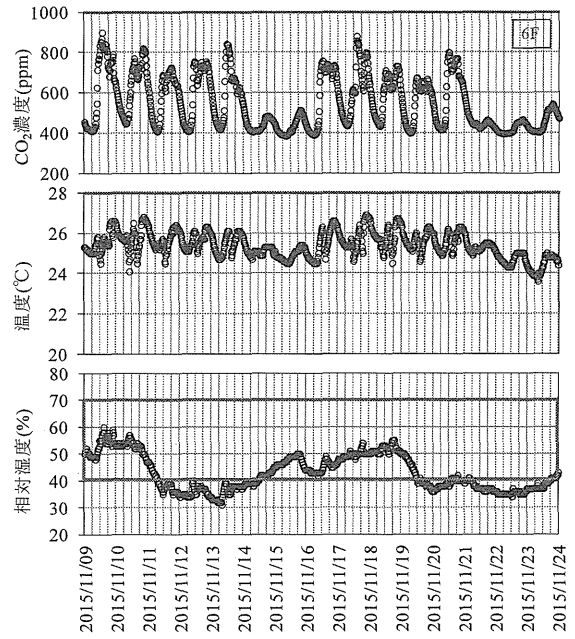


図 2-1-3 T5 (6F) 経時変化

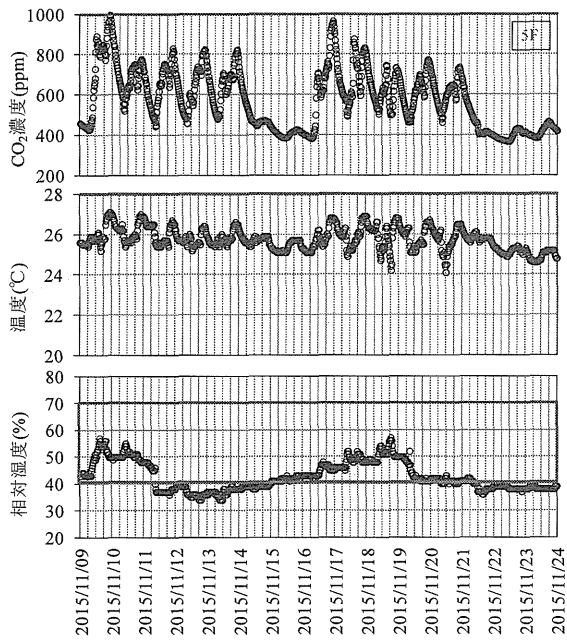


図 2-1-2 T5 (5F) 経時変化

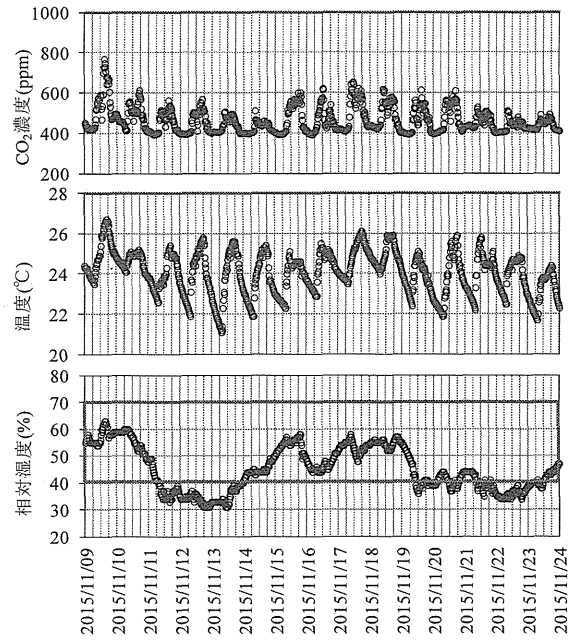


図 2-1-4 T6 経時変化

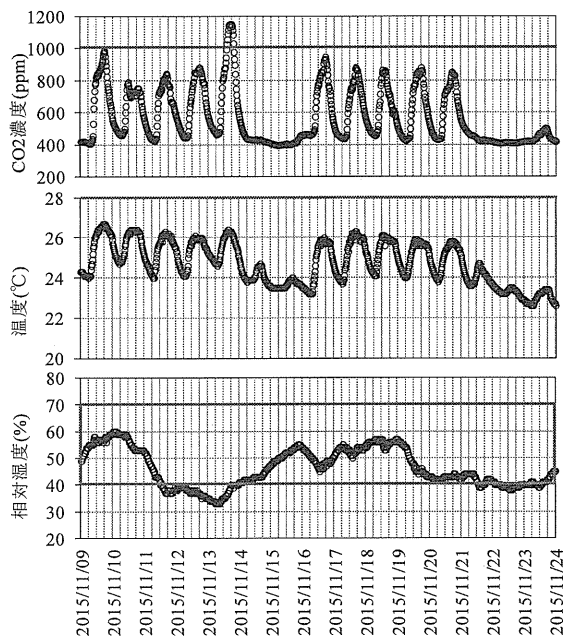


図 2-1-5 T18 (海側) 経時変化

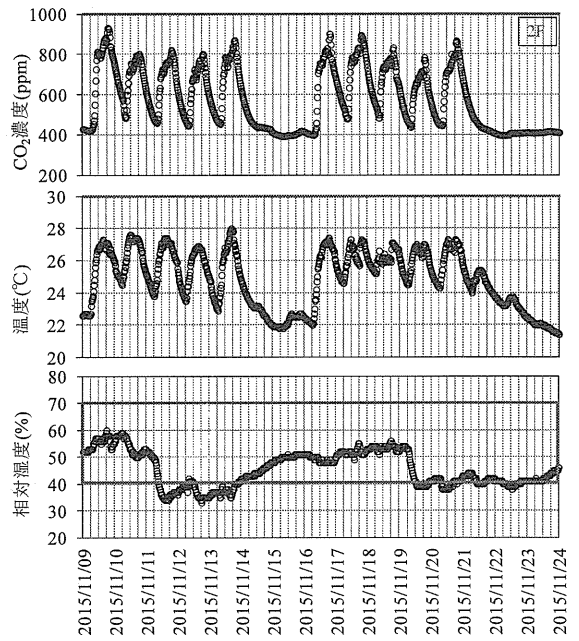


図 2-1-7 T19 (2F) 経時変化

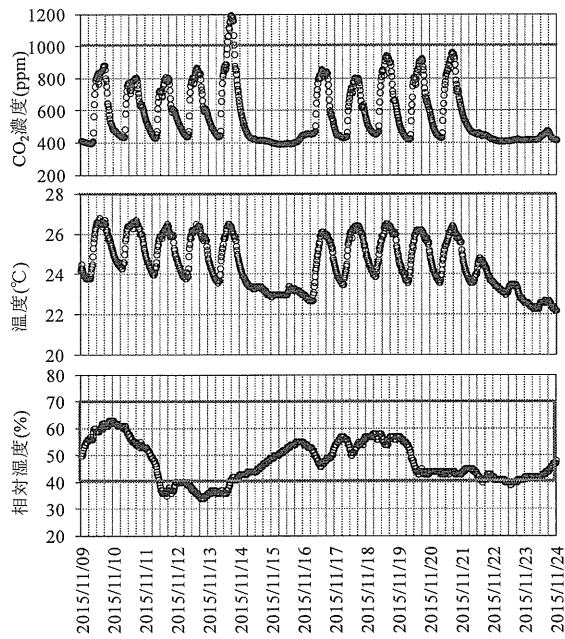


図 2-1-6 T18 (山側) 経時変化

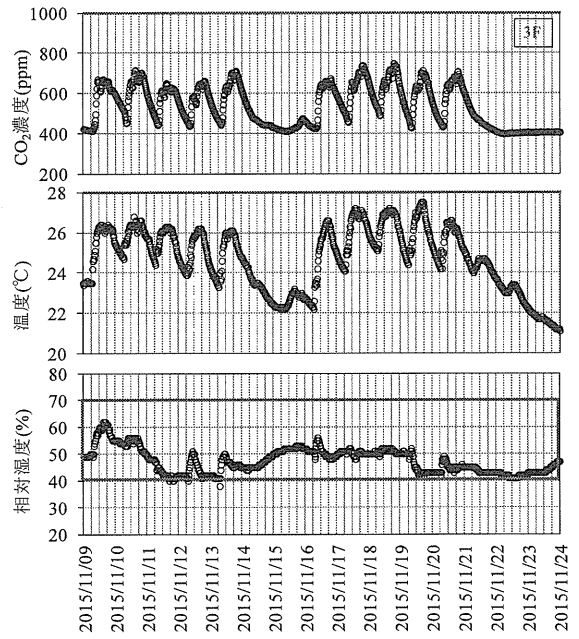


図 2-1-8 T19 (3F) 経時変化

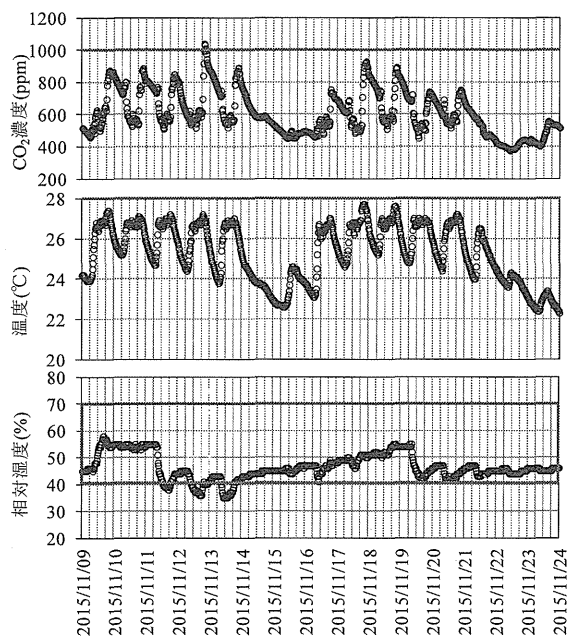


図 2-1-9 T17 経時変化

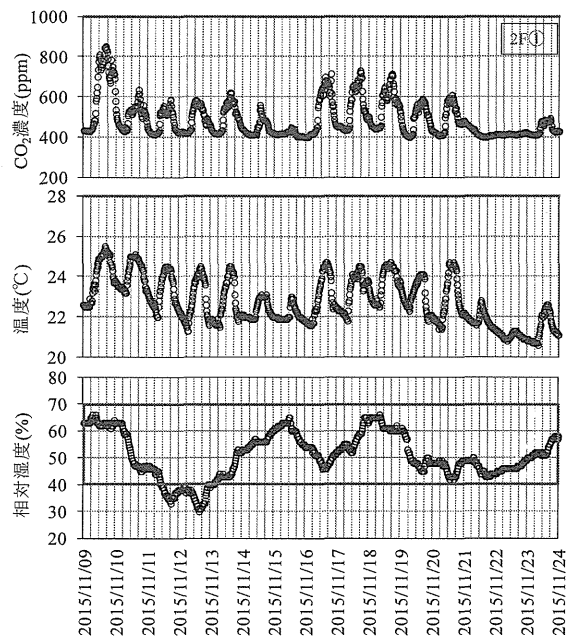


図 2-1-11 O3 (2F①) 経時変化

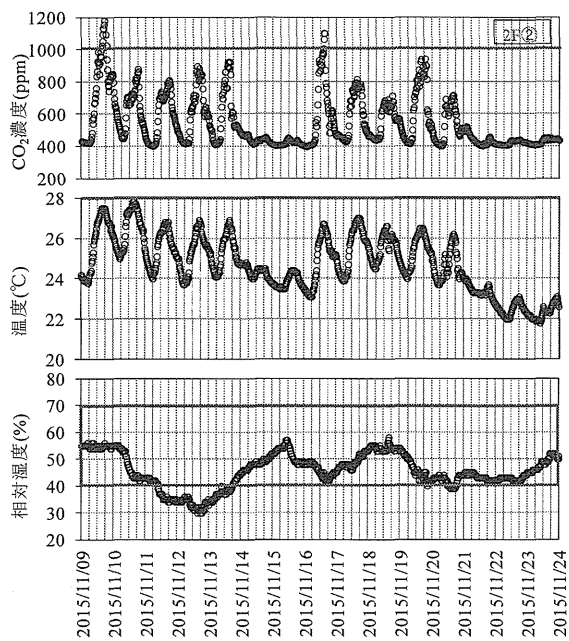


図 2-1-10 O3 (2F②) 経時変化

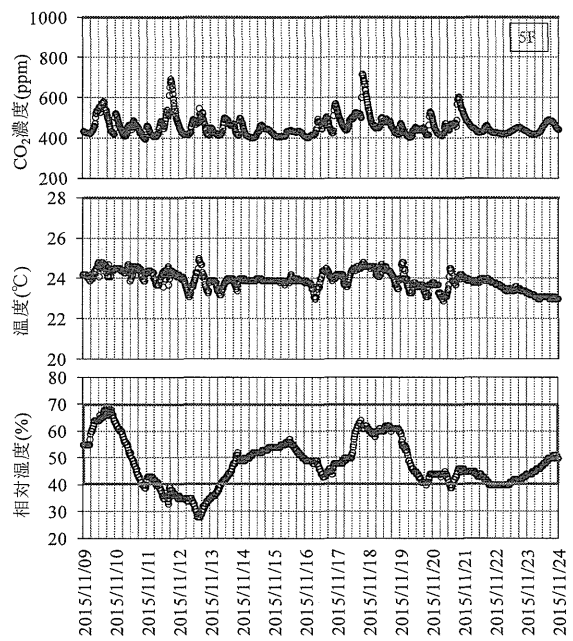


図 2-1-12 O3 (5F) 経時変化

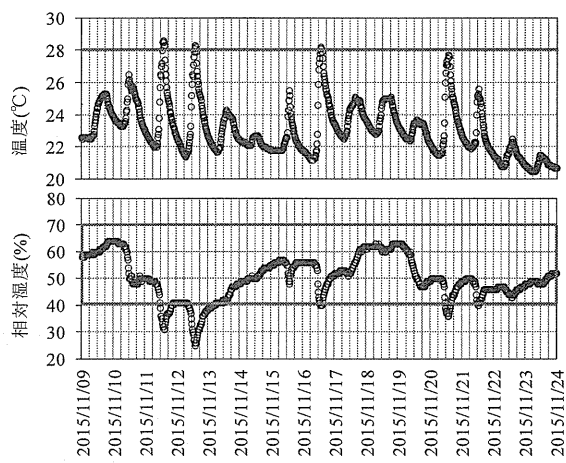


図 2-1-13 O4 (5F) 経時変化

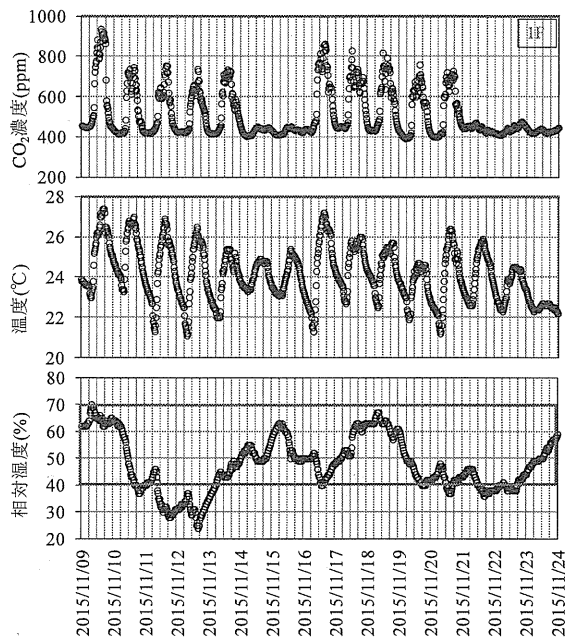


図 2-1-15 O5 (1F) 経時変化

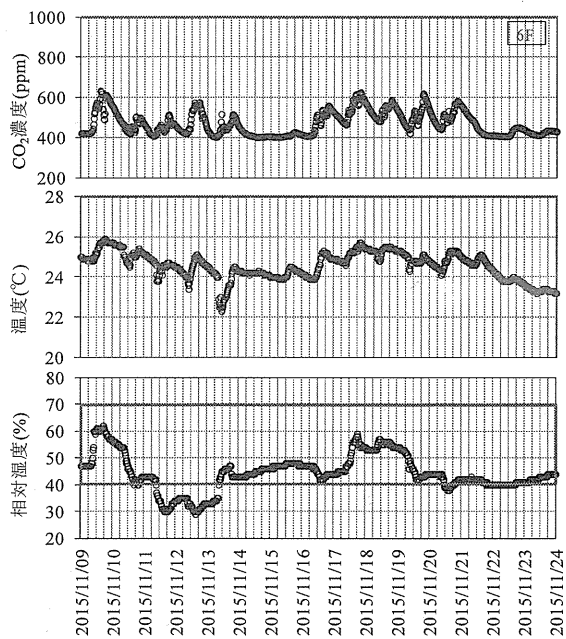


図 2-1-14 O4 (6F) 経時変化

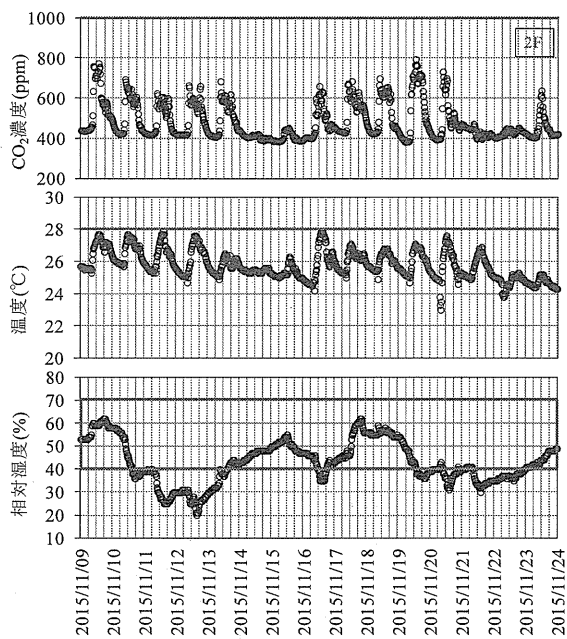


図 2-1-16 O5 (2F) 経時変化

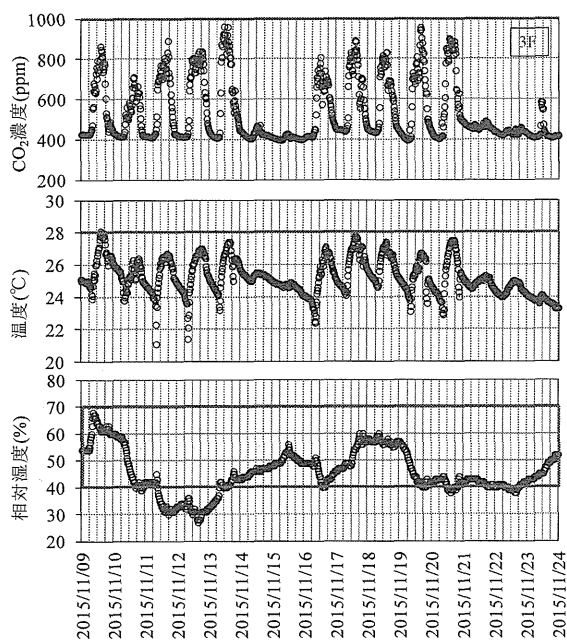


図 2-1-17 O5 (3F) 経時変化

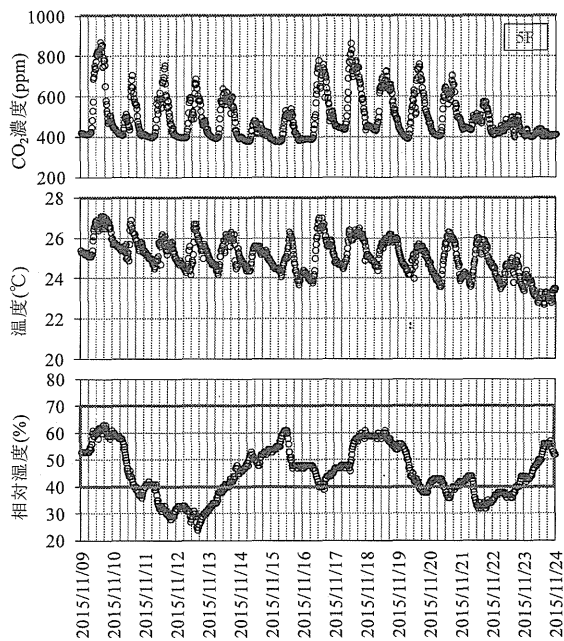


図 2-1-19 O5 (5F) 経時変化

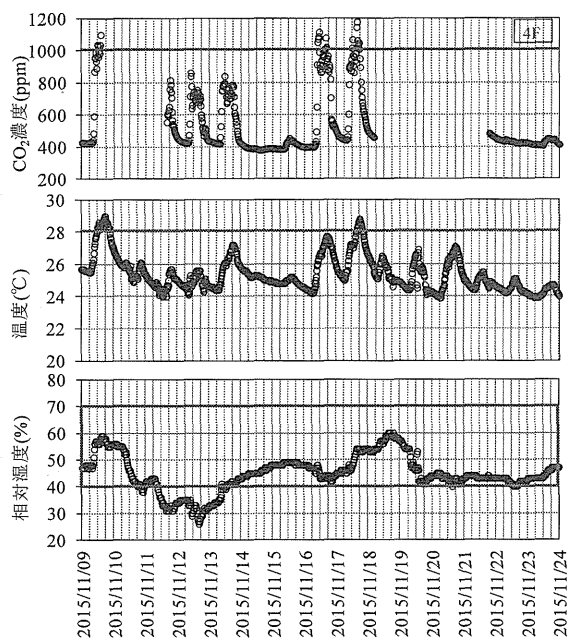


図 2-1-18 O5 (4F) 経時変化

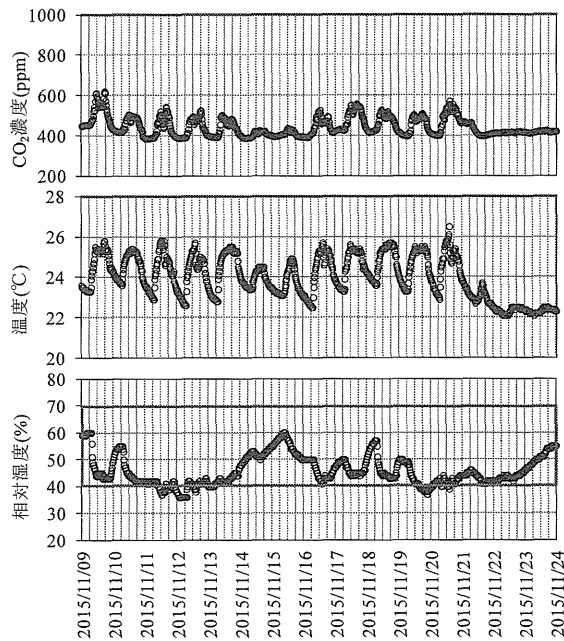


図 2-1-20 O6 経時変化

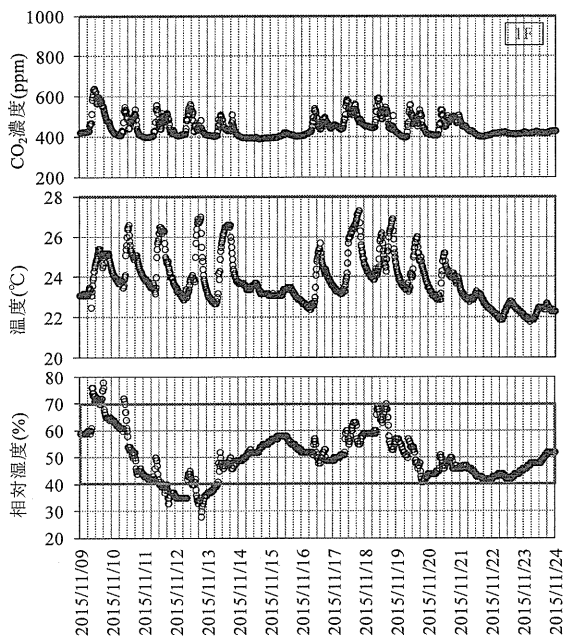


図 2-1-21 O8 (1F) 経時変化

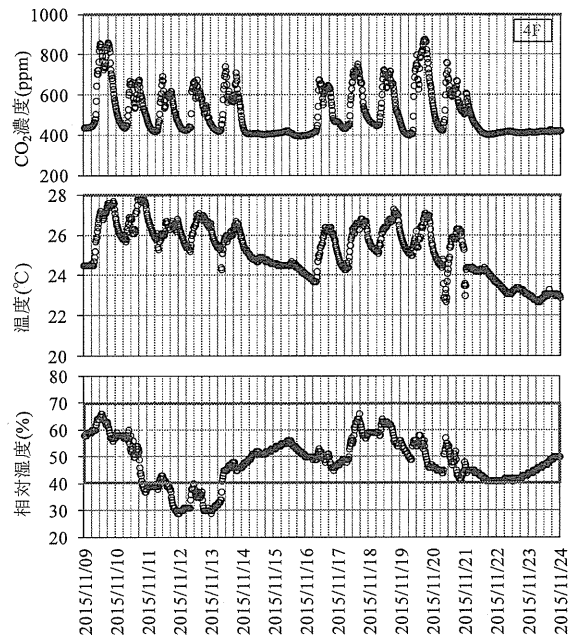


図 2-1-23 O8 (4F) 経時変化

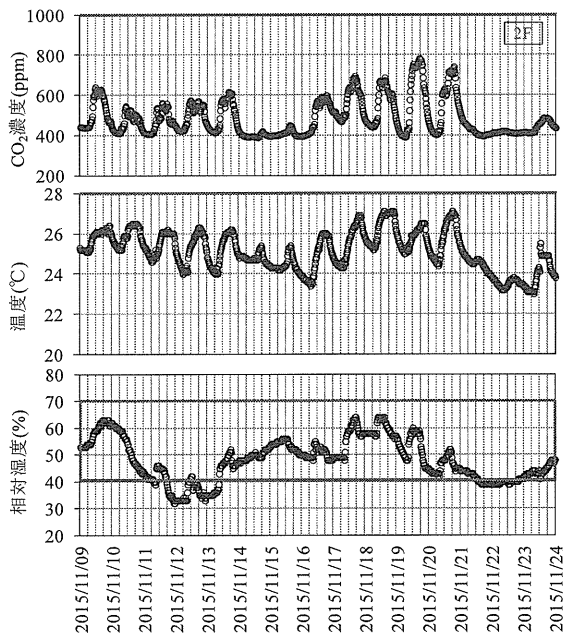


図 2-1-22 O8 (2F) 経時変化

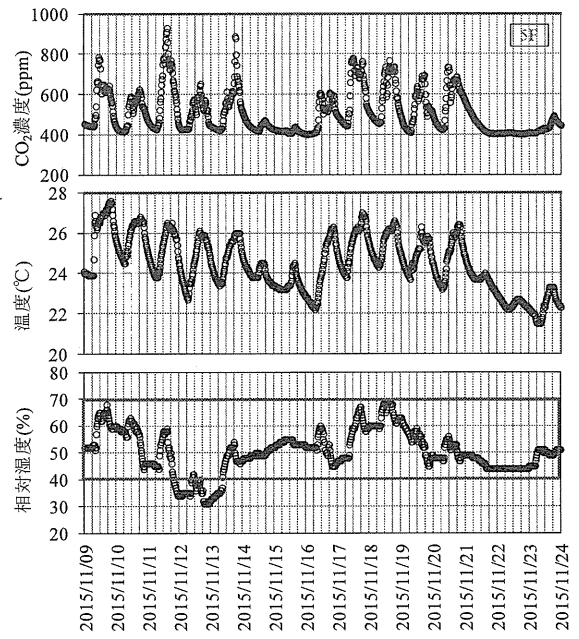


図 2-1-24 O8 (5F) 経時変化

C.2.2 浮遊微生物

図 2-1-25 に夏期と秋期の浮遊細菌濃度，図 2-1-26 に夏期と秋期の浮遊細菌の室内濃度と外気濃度の比を示す。図中の線は日本建築学会 AIJES-2005-A02 の維持管理規準値 (500cfu/m³)を示している。浮遊細菌濃度の結果において，O4 及び O8 などの個別空調方式を使用している建物では，使用者が換気の電源を切り替えられるようになっており，測定時には換気が OFF になっていた。そのために十分な換気がなされていないために細菌濃度が高くなっている。

夏期と秋期の室内と外気の比を見ると，ほとんどの建物で I/O 比が 1 を上回っており，室内に主な発生源があると考えられる。

図 2-1-27 に夏期と秋期の浮遊真菌濃度，図 2-1-28 に夏期と秋期の真菌細菌の室内濃度と外気濃度の比を示す。図中の線は日本建築学会 AIJES-2005-A02 の維持管理規準値 (50cfu/m³)を示している。

浮遊真菌濃度の結果において，秋期の O4 では測定時に窓開け換気を行っていたために，外気に主な発生源があると報告されている浮遊真菌が室内に多く侵入し，基準値を超える結果になったと考えられる。

夏期の T18 の給気濃度からは，外気濃度の 90%程の濃度が検出された。T18 は個別空調方式を使用しており，空調機を経由せずに外気を取り入れる換気システムでの測定を行った。この換気システムにはエアフィルタがないために，外気の汚染物質が室内に多く侵入していることが明らかになった。外気の汚染物質を除去するために，換気システムにもエアフィルタを導入することが望ましいことがわかった。

室内濃度と外気濃度の比において，夏期と秋期のほとんどの建物で I/O 比は 1 を下回っており，室内に主な発生源がないことが示唆された。

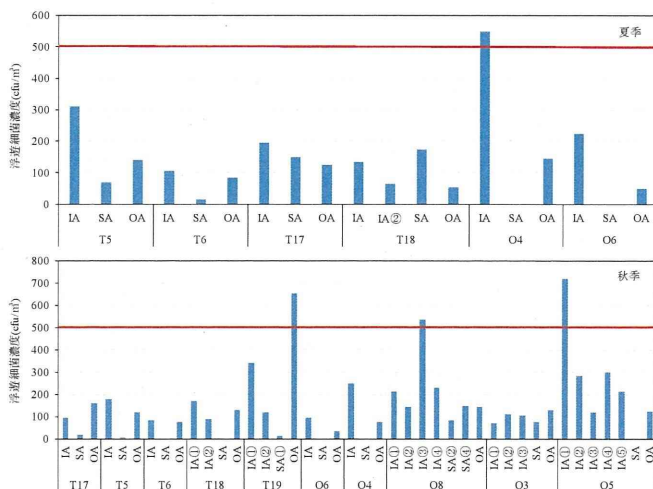


図 2-1-25 夏期と秋期の浮遊細菌濃度

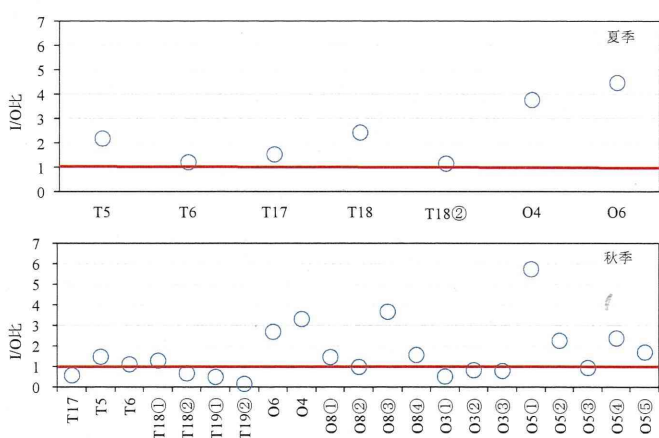


図 2-1-26 室内濃度と外気濃度の比

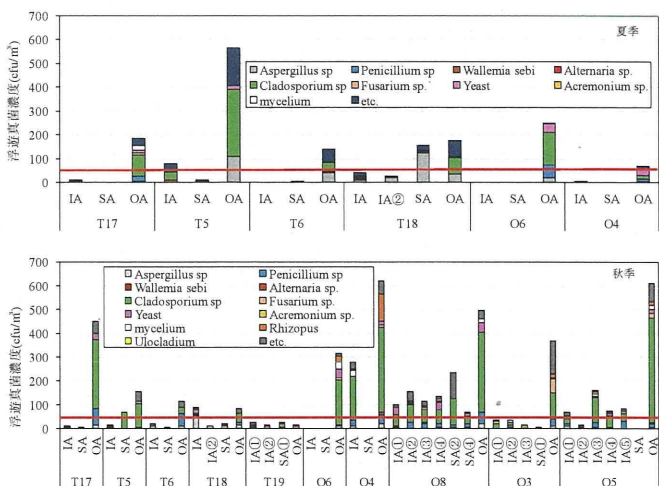


図 2-1-27 夏期と秋期の浮遊真菌濃度

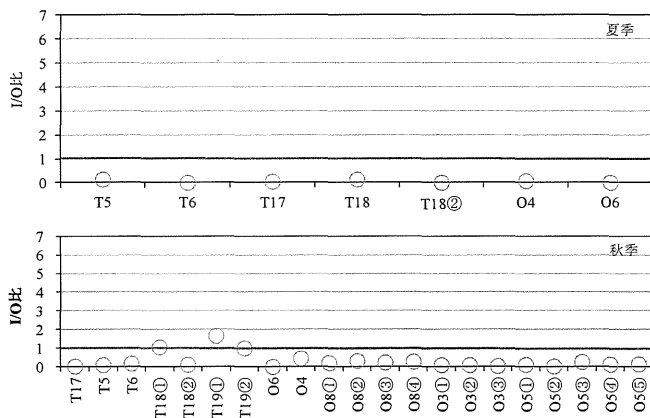


図 2-1-28 室内濃度と外気濃度の比

C.2.3 浮遊微粒子

図 2-1-29 に浮遊微粒子の給気濃度と外気濃度の比を示す。夏期と秋期の給気濃度と外気濃度の比において、1 を超える建物はないことから全ての建物の空調機内には主な発生源がないことが示唆された。

粒径別に比較すると、粒径の小さいほうが粒径の大きい粒子の S/O 比（吸気口濃度と外気濃度の比）よりも高くなっている。これは粒径が小さいと空調機に設置されているエアフィルタで除去しきれずに、室内に侵入してきていることが示唆された。

中央方式の建物よりも個別空調方式の建物の S/O 比は高くなっている傾向にある。外気を取り入れる換気系統にエアフィルタがないために、より多くの外気の汚染物質が室内に侵入してきていると考えられる。

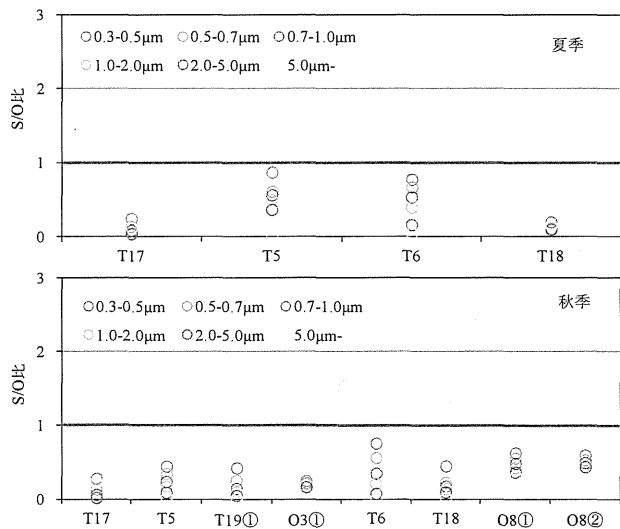


図 2-1-29 給気濃度と外気濃度の比

C.2.4 化学物質

各測定点における各化学物質の最小、平均、最大値について、表 2-1-2 に示す。ホルムアルデヒドの基準値及びその他の厚生労働省による指針値、TVOC の暫定目標値を上回ることとはなく、十分に低い値となっていた。

表 2-1-2 化学物質濃度の概要[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

	Min.	Mean	Max.
ホルムアルデヒド	4.7	15.1	32.9
アセトアルデヒド	2.2	9.0	19.0
ベンゼン	0.9	1.6	2.3
トルエン	3.9	19.6	57.7
エチルベンゼン	1.9	6.3	14.9
キシレン	2.1	5.1	9.5
スチレン	1.6	2.6	4.4
p-ジクロロベンゼン	0.7	3.1	23.5
テトラデカン	1.1	2.9	9.4
TVOC	25.5	129.8	323.3

C.2.5 PM_{2.5}

図 2-1-30 に各室内における PM_{2.5} 濃度の測定結果、及び室内と外気濃度の比を表す I/O 比を示す。今回の測定箇所においては、PM_{2.5} 濃度が 0.002~0.03 mg/m^3 程度となり、大気の基準値の「1 日平均値が 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下」を下回る結果となった。同一建物において複数箇所を計測している測定点では、概ね同様の濃度となっていた。

図 2-1-31 には、I/O 比も示しているが、0.1 から 1 を超過する値となった。O05 及び O08 については、複数箇所測定している物件であり、こちらも値としては建物毎に同様の値を示していた。O05 については、居住者の多さから、室内での発生量が多いこと、O08 については、個別空調建物であり、全熱交換換気扇のエアフィルタの透過率が大きいことによるものと考えられる。一方、I/O 比の低い T05, T17, O06, O05, O03 については、中央式方式であり、空調機に設置されているエアフィルタにより、確実に除去されていることが考えられる。

以上のように、室内 PM_{2.5} 濃度については、室内での発生源がある場合、また外気からの侵入により、その濃度が高くなる可能性がある。

る。特に建物により濃度、I/O 比が同様の傾向を示していることから、外気からの侵入、外調機等の特性によるものが考えられる。

図 2-1-5-2 には、各計測点における粒径 0.3 μm 以上及び 2 μm 以上の粒径別個数濃度による I/O 比を示す。PM_{2.5} の I/O 比の傾向と同様に、O05 及び O08 が高くなっていた。また粒径 2 μm 以上と粒径 0.3 μm 以上では、粒径 0.3 μm 以上の方が高い値となっていた。エアフィルタの捕集効率は粒子の粒径によって大きく異なり、粒径 0.3 μm 前後においてはフィルタの最大透過粒径となるので、特に個別方式においては、この粒径範囲の外気の侵入が多いことが考えられる。室内における粉じんの粒径別質量濃度分布は、微小粒径側での粒径 0.2-0.3 μm 付近にピークが存在することが確認されており、この主ピークが PM_{2.5} を占めていることから、この粒径範囲を除去することが室内 PM_{2.5} の制御には重要となってくる。一方、O08 においては、粒径 2 μm 以上の方が高い値となっていた。前述したように、この建物では執務者及び来訪者が多く、人員由来の発生源が多いことから、室内での発生によるものと考えられる。

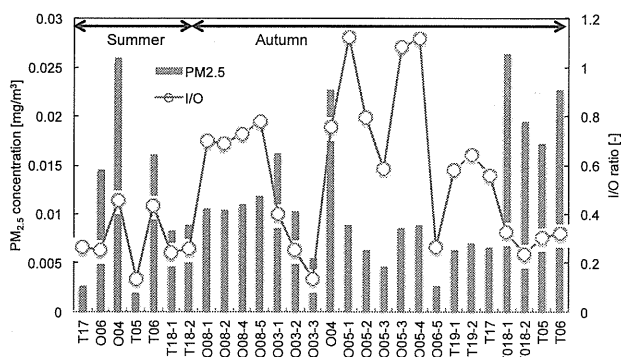


図 2-1-30 各室の PM_{2.5} 濃度と I/O 比

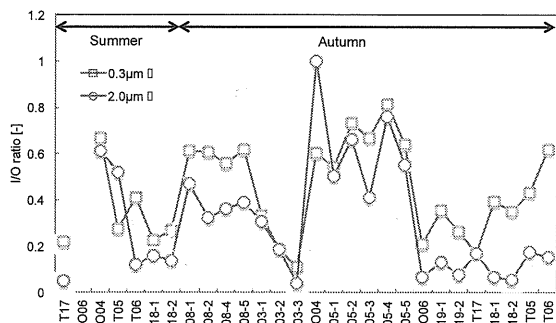


図 2-1-31 浮遊微粒子の I/O 比

C.2.6 エンドトキシン

C.2.6.1 現場測定結果

現場で捕集を行ったゼラチンフィルタ及び MCE フィルタは PBS 液 10ml に溶出させて不活性化・保管した後、分析を行ったが、ゼラチンフィルタの気中エンドトキシン濃度平均は 974±550 EU/m³ (外れ値 2 点を除く)、MCE フィルタは 7.4±10.3 EU/m³ とゼラチンフィルタの値が非常に高い結果となった。

そのため、反応干渉に関するブランク試験を行うこととし、ゼラチン及び MCE フィルタを PBS 保存液 (10ml) に溶出・希釈した試験を行った。ブランク試験からゼラチンフィルタがゲル化反応に影響していることと、その濃度が 200~500 EU/m³ 程度であることが分かった。ゼラチンフィルタの反応干渉が大きすぎるため、後述する現場測定結果では MCE フィルタのみの結果を示す。

表 2-1-3 PBS 液とフィルタの反応干渉試験

内容	Tg	濃度	希釈倍率
PBS X10	16.0	1.62	1
PBS X10	14.8	2.09	1
PBS X100	32.4	1.61	10
PBS X100	30.2	2.03	10
PBS X1000	108.2	0.31	100
PBS X1000	88.6	0.60	100
Gel X10	7.0	24.14	10
Gel X10	7.0	24.14	10
Gel X100	13.6	27.54	100
Gel X100	14.0	25.05	100
Gel X1000	50.4	3.81	1000
Gel X1000	49.8	3.96	1000
MCE X10	21.2	0.65	10
MCE X10	17.8	1.14	10
MCE X100	44.8	0.56	100
MCE X100	36.4	1.10	100
MCE X1000	>120	—	1000
MCE X1000	108.8	0.31	1000

※ ここで、PBS×10 は PBS 液 10ml のブランク、PBS×100 は PBS×10 を蒸留水で 10 倍希釈したもの。Gel×10 及び MCE×10 は各フィルタを PBS 液 10ml に溶出、Gel×100 及び MCE×100 は Gel×10 と MCE×10 を蒸留水で更に 10 倍希釈したものである。

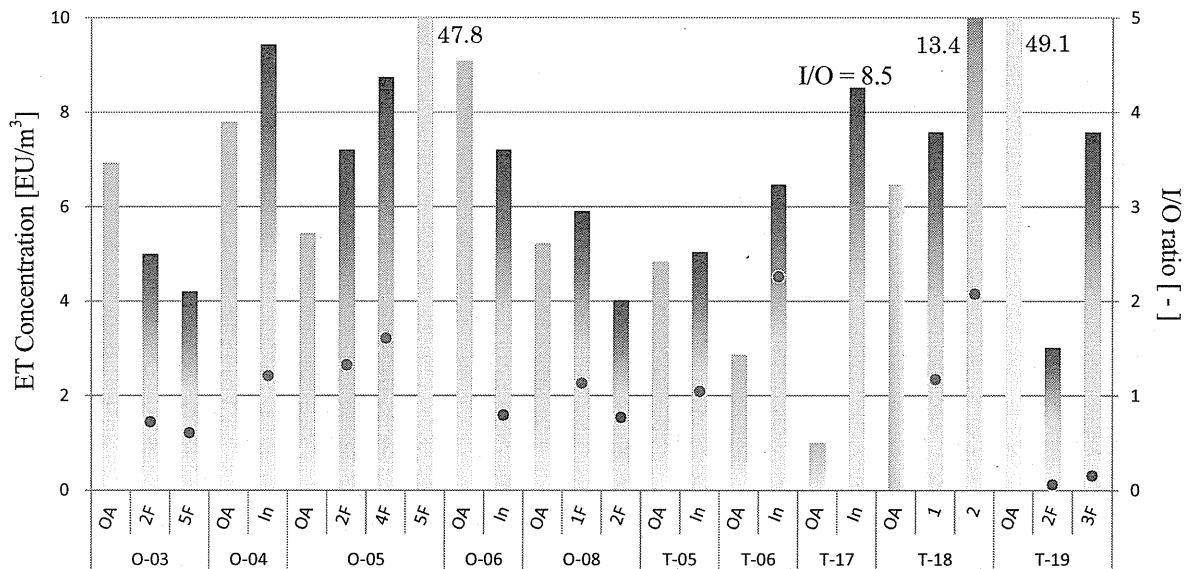


図 2-1-32 空气中エンドトキシン濃度 (秋期)

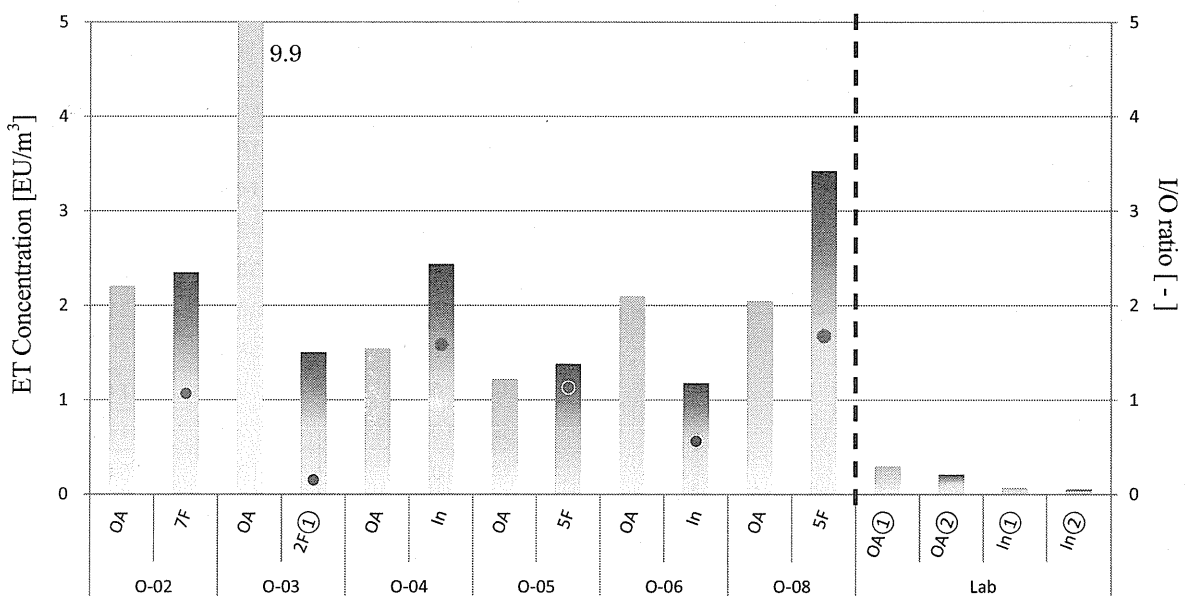


図 2-1-33 空气中エンドトキシン濃度 (冬期)

表 2-1-4 特定建築物におけるエンドトキシン測定結果

	秋期		冬期		全体	
	OA (n=10)	In (n=16)	OA (n=6)	In (n=6)	OA (n=16)	In (n=22)
Max	49.1	47.8	9.9	3.4	49.1	47.8
Mean ± SD	9.9 ± 14.0	9.5 ± 10.5	3.2 ± 3.3	2.0 ± 0.9	7.4 ± 11.5	7.4 ± 9.5
Min	1.0	3.0	1.2	1.2	1.0	1.2

「フィルタの反応干渉試験（表 2-1-3）」でも述べたが、ゼラチンフィルタの気中エンドトキシン濃度平均は $974 \pm 550 \text{ EU/m}^3$ （外れ値 2 点を除く）と MCE フィルタの $7.4 \pm 10.3 \text{ EU/m}^3$ に比べ非常に高い値となった。ゼラチンフィルタのゲル化反応への干渉影響が大きいため、ここでは MCE フィルタのみの結果を示す。図 2-1-32 には MCE フィルタによる秋期測定結果を、図 2-1-33 は MCE フィルタによる冬期測定結果を示す。図 2-1-33 の Lab 測定結果はオフィス現場ではないため、集計には含まない。図中の棒グラフは空気中エンドトキシン濃度 (EU/m^3)、●印は I/O 比（単位無し）である。

外気濃度の平均は $7.4 \pm 11.5 \text{ EU/m}^3$ 、室内濃度は $7.4 \pm 9.5 \text{ EU/m}^3$ と大きな差はなかった。冬期より秋期濃度が高い傾向にあり、秋期濃度は最大 49.1 EU/m^3 、最小 1.0 EU/m^3 と幅広い分布となったが、冬期は最大 9.9 EU/m^3 、最小 1.2 EU/m^3 とその差は小さく、また室内濃度においては最大 3.4 EU/m^3 最小 1.2 EU/m^3 と更に幅が狭まった。季節・地域別濃度特性を把握するためには今後、更に測定を重ねる必要がある。Lab は MCE フィルタにそれぞれ 100L の空気サンプリングを行った後、PBS 保存液ではなくそのまま試験管（滅菌済み）に回収し、蒸留水を添加して溶出・分析したものである。こちらは外気 (OA)、室内 (In) とともに 0.5 EU/m^3 以下と低い値となった。

MCE フィルタ自体はゲル化反応に干渉しないことが確認されたが今回の特定建築物測定では現場サンプリングの回収に PBS 保存液を用いたため、PBS 液が干渉している。現場測定の結果はその PBS のブランク値を差し引いた値を用いているが、その干渉の影響を完全に排除できていない可能性を否定できない。

C.2.6.2 捕集フィルタのブランク

PBS 液のゲル化干渉があるため、2 種類のフィルタと蒸留水のためのブランク試験を行った結果を表 2-1-5 に示す。ゼラチンフィルタは全ての条件でゲル化反応干渉を起こしているが、MCE フィルタは低倍率の希釈条件でも干渉を起こさない結果となった。

表 2-1-5 フィルタブランク試験

内容	Tg	濃度	希釈倍率
Gel-Wat①X10	5.6	50.06	10
Gel-Wat②X10	7.2	22.02	10
Gel-Wat①X100	10.2	70.52	100
Gel-Wat②X100	14.4	22.85	100
Gel-Wat①X1000	27.6	27.25	1000
Gel-Wat②X1000	34.8	12.77	1000
MCE-Wat①X10	>120	-	10
MCE-Wat②X10	>120	-	10
MCE-Wat①X100	>120	-	100
MCE-Wat②X100	>120	-	100

本年度の測定及び実験結果を踏まえて、今後はゲル化反応に干渉のない MCE フィルタ及び蒸留水による現場測定を行う。

C.2.6.3 考察

室内エンドトキシン濃度については様々な濃度結果が報告されている。SH. Hwang ら⁵⁾の研究によると、 0.5 EU/m^3 前後またはそれ未満という報告が多いとしているが、環境による違いも大きく 400 EU/m^3 を超える報告もあると指摘している。また、SH. Hwang らの実験室 5 室における空気中エンドトキシン濃度測定結果では 8.9 EU/m^3 未満と報告している。

本研究でも、干渉のない試験結果からは低い結果となっているが、これが本当の空気中に含まれている微生物由来のエンドトキシン濃度の真値なのかは、同時に試料採取を行った培養法や遺伝子分析法と比較検証を行う必要がある。また、外気濃度は冬期より秋期が高い傾向にあるように見えるが、地域・空調・在室状況の違いなど他の影響因子も考えられるため一概には言えない。

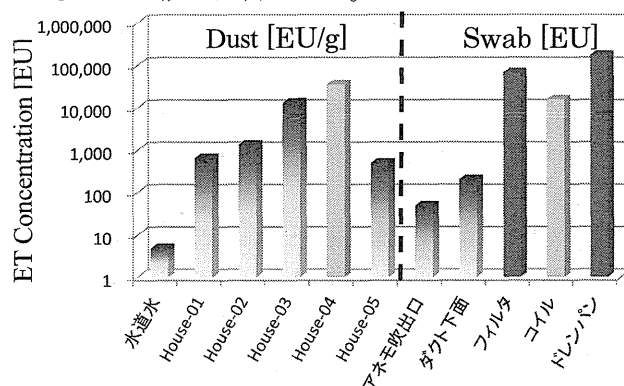


図 2-1-34 環境中エンドトキシン濃度の例

図 2-1-34 は水道水、ハウスダスト、空調機表面エンドトキシン濃度の測定例を示したものである。ハウスダストは最も高いところで 30,000EU/g 程度となっており、空調設備の表面や各部位は 100EU/(swab kit)未満から 10 万 EU/(swab kit)を超えるところまで差が大きい。このようにエンドトキシン濃度測定からは汚染されやすい部位や掃除前後の汚染合いが克明に現れる。

空気濃度についてはまだ課題が多く残されているが、空気を含め、水、ダスト、表面汚染など環境中エンドトキシン濃度の目安となる範囲を示すことで、環境に問題がないかを判別できると考えられる。

エンドトキシンは体内に直接摂取する場合はなるべく低い濃度が望ましいが、細菌はどこにでも存在するため必ずしも環境濃度が低いのが望ましいとは限らない。特に、薬剤、化学物質、カビなど、細菌の環境濃度に影響し得る他のリスク要素も多く存在する。

分担研究者である柳らのリアルタイム PCR による DNA 解析結果からは、96 属の菌が室内・屋外共通して検出されたが、屋外のみ検出された菌が 3 種 (Lentibacillus, Mogibacterium, Leptotrichia), また Actinomycetospora, Nevskia など 20 種近くが室内のみで検出され、外気ではなく人体由来の特定菌が室内に多く存在することが確認されている。

エンドトキシンはこのような菌種の定性はできず、定量値として表すしかない限界はあるが、真正細菌の殆どをグラム陰性菌が占めることから、エンドトキシン濃度が高いことは細菌汚染が多いと推定できる。現段階で、ダストや表面汚染度の定量には問題ないが、空気試料は濃度が低いことが多く現場測定の数を確認することと培養法や遺伝子分析法との比較検証を行い、精度確認を行う必要がある。

室内環境では換気指標として CO₂ 濃度を、化学物質汚染程度の指標として TVOC 濃度を用いている。一方、微生物は培養法が基本となっているため、結果導出までは時間を要する。最近 PCR 法を用いた DNA 解析など先

端技術も導入されつつあるが、費用や現場活用の問題など一般利用にはまだ制約が多い。他に ATP 法や細菌の個数濃度測定機なども紹介されているがまだ確立した方法はない。環境中細菌汚染の指標が望まれるなか、エンドトキシン濃度は現場測定や分析の利便性・精度などの面から十分活用の可能性があると考えられる。

D. まとめ

・建築物利用者の職場環境と健康に関する実態調査 (絨毯調査) については、東京都と大阪市に所在する事務用途の特定建築物を対象に、東京都 5 件、大阪市 6 件の事務所から実態調査 (調査フロア数 24, 調査対象者数約 651 名) の協力を得たうえで、平成 27 年 6 月から順次、アンケート調査と室内環境の実測調査を計画通りに実施中である。

・温湿度・二酸化炭素濃度の連続測定の結果から、多くの建物で温度、二酸化炭素濃度は基準値を満足していたが、相対湿度に関しては、基準値である 40%を下回る建物があり、上記と同様に、冬期における加湿の対策が必要である。

・浮遊真菌と浮遊微粒子の結果から、個別空調方式の外気を取り入れる換気システムにはエアフィルタが設置されていないために、外気から多くの汚染物質が室内に侵入してきていることが明らかになった。外気からの汚染物質を除去するために換気システムにもエアフィルタを導入することが望ましい。

・化学物質については、ホルムアルデヒドの基準値、厚生労働省による指針値及び TVOC の暫定目標値を超過する建物はなく、比較的 low 濃度であった。

・PM_{2.5} 濃度測定結果も、0.002~0.03 mg/m³ 程度となり、大気の基準である「1 日平均値が 35 µg/m³ 以下」を下回った。また、I/O 比については、同一建物内の濃度は概ね同様の値を示しており、室内での発生源のほか、外気からの侵入に対処する建物空調機 (フィルタ) の特性が関係しているものと考えられた。

・エンドトキシンについては、本年度から新たに試みた測定である。室内環境では換気

指標としてCO₂濃度を、化学物質汚染程度の指標としてTVOC濃度を用いているが、微生物は培養法が基本となっているため結果算出までは時間を要する。機械を用いた環境中細菌汚染度測定にはまだ確立した方法がなく、汚染指標として活用できる指標が望まれている。本研究では室内空気中の微生物汚染度を示すバロメータとしてエンドトキシンを挙げ、現場測定法の確立を目標に現場測定と実験を行った。

空气中エンドトキシン濃度の定量試験に干渉を起こす因子が複数存在したため、それらの干渉因子を排除する基礎試験と現場測定を平行して行った。本年度の結果を踏まえて次年度からは干渉影響のないフィルタを用いて実態調査を行うこととした。

E. 参考文献

- 1) 大澤元毅ら：建築物の特性を考慮した環境衛生管理に関する研究，平成21～22年度総括・分担総合研究報告書，厚生労働科学研究費補助金健康安全・危機管理対策総合事業，2011年3月。
- 2) 大澤元毅ら：建築物の特性を考慮した環境衛生管理に関する研究，平成21年度総括・分担総合研究報告書，厚生労働科学研究費補助金健康安全・危機管理対策総合事業，2010年3月。
- 3) 東 賢一．建築室内環境に関連する症状とそのリスク要因—日本におけるシックビルディング症候群の現状—．保健医療科学 63(4):334-341, 2014.
- 4) 大澤元毅ら．建築物環境衛生管理及び管理基準の今後のあり方に関する研究，平成25年度総合研究報告書，厚生労働科学研究費補助金健康安全・危機管理対策総合事業，2014年3月。
- 5) US Environmental Protection Agency: A standardized EPA protocol for characterizing indoor air quality in large office buildings. Washington, D.C., US Environmental Protection Agency, 2003.
- 6) National Institute for Occupational Safety and Health: Indoor Air Quality and Work Environment Symptoms Survey, NIOSH Indoor Environmental Quality Survey. Washington, DC: NIOSH, 1991.
- 7) Andersson K: Epidemiological approach to indoor air problems. *Indoor Air* 4 (suppl): 32-39, 1998.
- 8) 厚生労働省：職業性ストレス簡易調査票，2005.
- 9) Sung Ho Hwang, DongJin Park, Wha Me Park , Dong Uk Park, Jae Kyoung Ahn, Chung Sik Yoon : Seasonal variation in airborne endotoxin levels in indoor environments with different micro-environmental factors in Seoul, South Korea, *Environmental Research* 145 (2016), pp.101-108, 2016

2-2 高層建築物における煙突効果と空気質

A. 研究目的

一般的に高層建築ではエレベータシャフト及び階段室などの堅穴区画を通して鉛直方向での圧力差が生まれ、煙突効果が発生する。これまで自然エネルギー利用換気システムの研究が活発に行われ、多くの建築で煙突効果現象を利用した自然換気システムが導入されている。しかし一方で、煙突効果により生じる鉛直方向の圧力差が発生要因となる不具合を生じる事例が増えている。煙突効果現象が要因となる不具合として、外気の流入、エレベータ扉・階段扉の風切音、エレベータ扉、階段扉の開閉障害などが挙げられる。そして、それらに関して従来から多くの検討がなされており、対応策も提案されている¹²⁾。

一方で、煙突効果現象による気流が起因となる汚染空気の拡散及び移流も懸念される。煙突効果現象が発生要因となる堅穴区画内の上昇気流により、下層階の使用空気が堅穴区画へ流れ込み、そこから上層階へ移動する現象の発生が想定される。実際に上層階での下層階からの臭気の拡散等が確認されている³⁾が、煙突効果の汚染移流に対する影響を検討されていない。

そこで、今回一般的な高層建築における空気質の悪化と建築内の鉛直方向の変位の関係に一貫性を持った傾向が見られるかどうか検討した。煙突効果が要因となる建物内部の上昇気流による汚染の拡散への影響を明らかにするため、測定階の高さと汚染物質濃度の相関性を評価した。

B. 方法

B.1 東京都特定建築物実測データの分析

先に使用した東京都の立ち入り検査による東京都内の特定建築物実測データを用いて分析を行った。実測データのうち、地上15階以上の事務用途建築85件を抽出し、測定階の高さと汚染濃度との関係を表す2変数について、下記のパターンに分け、それぞれのパターンにおける2変数の相関性の有無を検討した。

1) 汚染濃度 (CO₂濃度, CO濃度, 粉じん濃

度) と測定階

- 2) 汚染濃度 (CO₂濃度, CO濃度, 粉じん濃度) と建築の軒高に対する測定点の相対的な高さ (測定場所の階数/最上階の階数)
- 3) 中性帯の位置における汚染濃度 (CO₂濃度, CO濃度, 粉じん濃度) を1とした時のその他の階における相対的な汚染濃度と建築の軒高に対する測定点の相対的な高さ (測定場所の階数/最上階の階数)

上記のそれぞれのパターンにおけるパラメータ同士の相関関係を確認するため、各パターンにおける2つパラメータを2変数として Pearson の積率相関係数 r を次に示す式により算出した。この係数の正負が相関関係の正負を示し、係数の絶対値の大きさが相関関係の強さを示す。

また、パターン3)に関して、中性帯は既往研究⁴⁾を参照して建物全体の0.2~0.3程度の高さとし、その範囲内の汚染濃度を基準とした際の際の他階の汚染物質濃度を算出した。

Pearson Product-Moment Correlation Coefficient

$$r = \frac{\text{the Covariance of the Two Variables}}{\text{the Product of Standard Deviations}}$$
$$= \frac{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}$$

X_i, Y_i : Two Variables, n : Number of Values

B.2 高層オフィスビルにおける実測調査

高層建築内部の空気環境を把握するため、実在の高層建築を対象として、室内空気質の実測調査を行った。実測対象の建築は都内の地上14階建て延べ床面積20,580.88m²のオフィスビルである。1階は駐車場、エントランス、2階は受付及び会議室で構成される。また、3階から12階までは事務室として使用されており、ほぼ同様の平面計画で構成されている。3階から12階までの基準階平面図を図2-2-1に示す。エレベータシャフト、階段室及びトイレがいずれも北側設けられる偏心コア

の計画となっている。北面中央にあるエレベーターシャフト及びコア区画の両端に設けられている階段室が堅穴区画として上下階を接続している。事務室はエレベーターホールと直接接続されておりその境界部分に扉は設けられていない。

この建物の基準階のうち 4, 5, 6, 8, 10, 12 階において空気環境調査を行った。測定項目は温湿度、CO₂ 濃度、CO 濃度、PM_{2.5} 濃度及び、空気中の粒子個数とした。温湿度、CO₂ 濃度、CO 濃度は IAQ Monitor (Kanomax Inc.) を用いて計測し、30 秒周期の平均値を 5 分間にわたり記録した。PM_{2.5} 濃度は Dust Track (TSI Inc.) を用いて 60 秒ごとの平均値を記録した。また、粒子個数は Particle Counter (Rion Co., Ltd.) を用いて 2.81 L 中の粒径別の粒子個数を計測した。

上記の測定を 4, 5, 6, 8, 10, 12 階における図 2-2-1 に示されるエレベーターホールとオフィスエリアの境界部一点で実施した。また実測調査は夏期 (2015/8/20)、中間期 (2015/10/20)、冬期 (2016/1/20) の 3 度にわたり同様に行った。

また、CO₂ 濃度は在室人数の影響を受けるため、10/20、1/20 の調査の際には各測定階における測定時の在室人数も計測した。

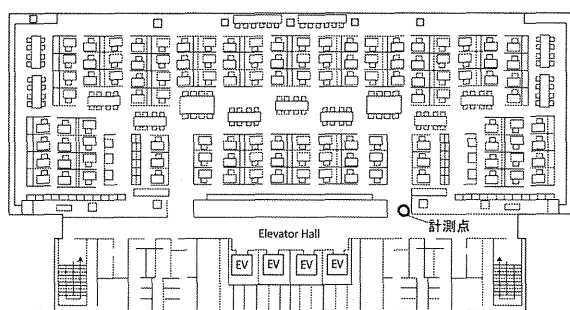


図 2-2-1 基準階平面図及び空気質計測点

C. 結果及び考察

C.1 東京都特定建築物実測データの分析

パターン 1) ~3) の汚染物質との 2 変数の散布図をそれぞれ図 2-2-2~図 2-2-4, 図 2-2-5~図 2-2-7, 図 2-2-8~図 2-2-10 に示す。また、それぞれのグラフの下部に 2 変数の相関係数を示す。ただし、粉じん濃度を表す散布図に

おける、他の値から大きく外れた値となっているプロットについては、外れ値として除外した上で相関係数を算出した。

概して、汚染物質濃度と汚染物質濃度との間に強い相関関係は見られなかった。しかしながら、パターン 2) の CO₂ 濃度と粉じん濃度に関してはわずかに正の相関性が見られ、特に二酸化炭素に関して上層階での濃度が比較的高くなる傾向を示した。

また、パターン 3) に関しては、いずれのケースにおいても負の方向の相関が見られた。当パターンに関しては、高層ビルの中性帯付近では上層部、下層部と比較して換気回数が相対的に少なくなるケースが多い。そのため、CO₂ 濃度などの室内に一定速度以上で発生する汚染源がある物質に関して、汚染物質の室内での滞留時間が長く、局所的に濃度が高く計測されるケースが多くある。そのため、中性帯付近と考えられる下から 0.2~0.3 の高さの汚染濃度を基準として比較した場合、上層部よりも濃度が高く計測され、負の相関が見られたと考えられる。

実測対象建物の在室人数及び換気システム等はそれぞれ異なることから、今回の分析により傾向の一般性を評価することは難しいが、これらの傾向が正しいものと仮定した場合、他のケースにおいて強い正の相関が見られなかった要因について以下のように考察した。

パターン 1) に関して正の相関が見られなかった理由として、85 件ある建築全てに関して、高さのパラメータを同一の測定階の高さとして評価したことに要因があると考えた。基本的に高層建築内部の外部開口との境界における差圧の分布は下層では負圧となり上層では正圧となる。そのため、煙突効果が要因となる上層階と下層階間の空気質の差異について検討する上では測定点の絶対的な高さは重要ではなく、それぞれの軒高を基準とした相対的な高さを用いて検討しなければならない。

また、パターン 2) に関して、CO 濃度の上層部での濃度の増加傾向が確認されなかった要因として、発生源の偏りが原因であると考えられる。CO₂ 及び粉じん濃度は発生速度の

違いはあるが、在室人数及び室の使用用途に応じて建築内での汚染源は多く存在する。その一方で CO は厨房及び駐車場などの強力な汚染源からの発生による影響がある。そのため、建築全体での CO の発生源の分布に偏りがあるため、全体的に一貫した傾向が見られなかったものと考えられる。

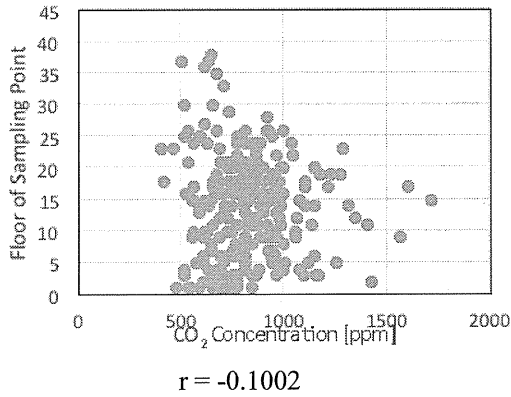


図 2-2-2 測定階と CO₂ 濃度の関係

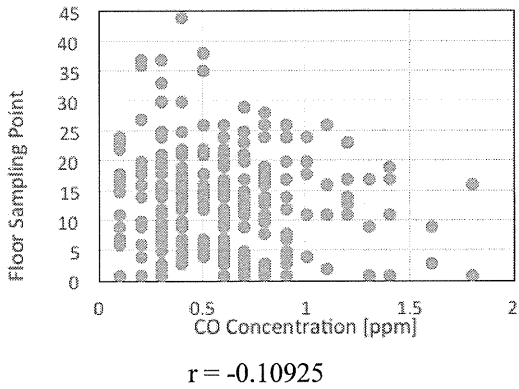


図 2-2-3 測定階と CO 濃度の関係

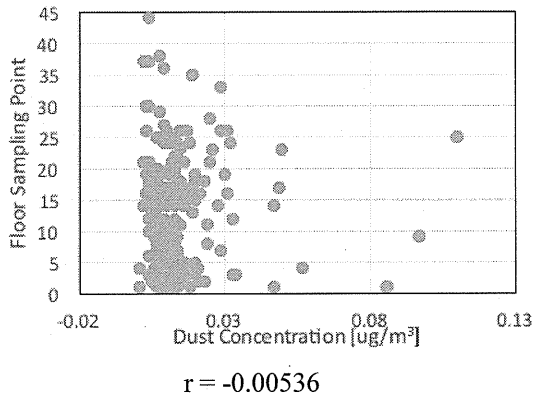


図 2-2-4 測定階と粉じん濃度の関係

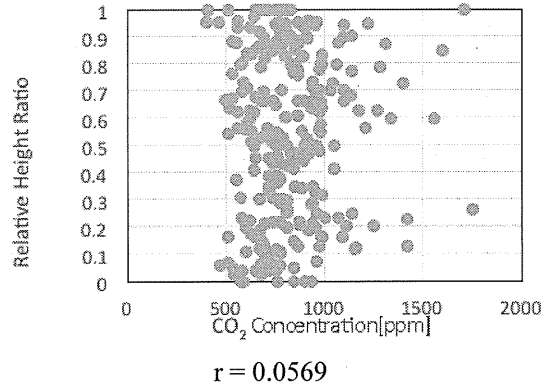


図 2-2-5 測定階相対高さ と CO₂ 濃度の関係

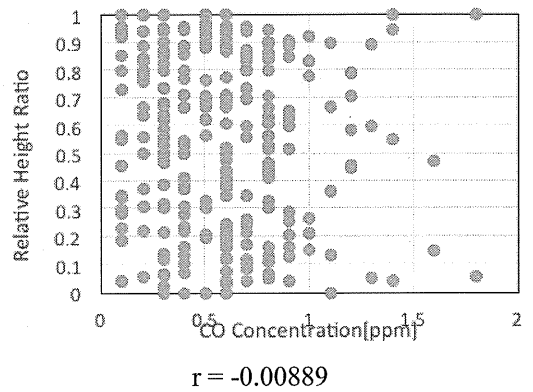


図 2-2-6 測定階相対高さ と CO 濃度の関係

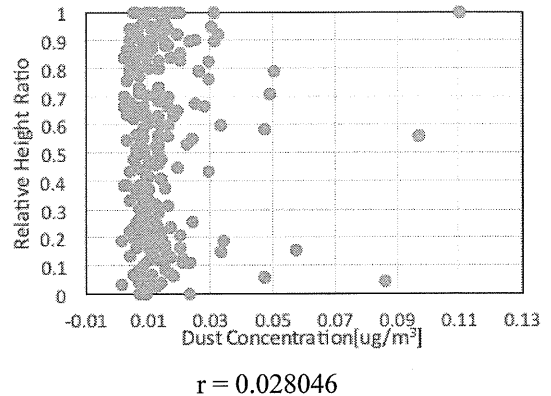


図 2-2-7 測定階相対高さ と粉じん濃度の関係

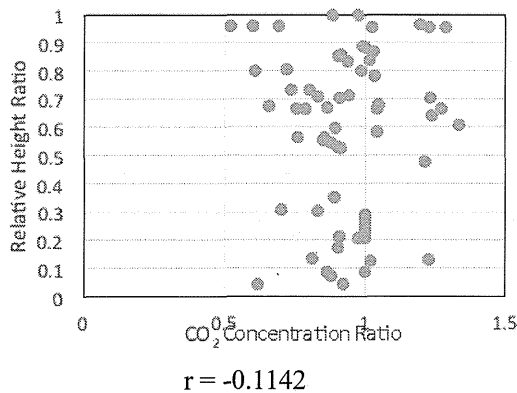


図 2-2-8 測定階相対高さとして中性帯を基準とした CO₂ 濃度の関係

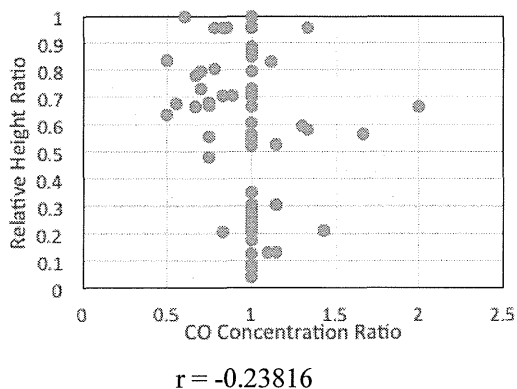


図 2-2-9 測定階相対高さとして中性帯を基準とした CO 濃度の関係

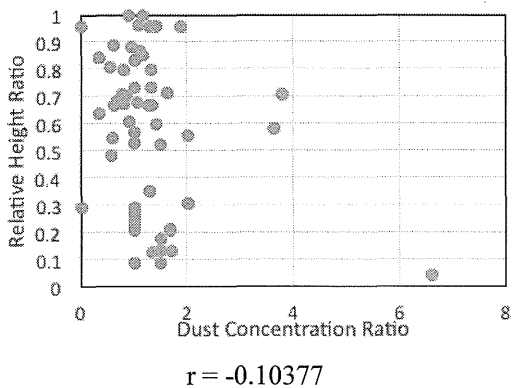


図 2-2-10 測定階相対高さとして中性帯を基準とした粉じん濃度の関係

C.2 高層事務所ビルにおける実測調査

10/20, 1/15 の実測時の各室の在室人数を表 2-2-1 に示す。また、CO₂ 濃度と測定階との関係を図 2-2-11 に示す。階毎の在室人数のばらつきはあるが、CO₂ 濃度と測定階との関係に

着目すると夏期、中間期、冬期ともに同様の傾向を示した。いずれの実測結果においても、ビルの中層付近で局所的な濃度の上昇が確認された。その後上階に行くにつれ減少するが、8 階以上で再度濃度上昇の傾向がみられた。

粒径 1.0 μm 以上の粒子の 1 m³ 当たりの個数と測定階との関係を図 2-2-12 に示す。粒子個数に関しては実測値の測定階との関係は測定日時によりばらつきが見られたが、いずれのケースにおいてもビルの中層付近で局所的な濃度の上昇が確認された。

PM_{2.5} 濃度と測定階との関係を図 2-2-13 に示す。PM_{2.5} 濃度の挙動は Particle Counter により計測された粒子個数とほぼ同様の傾向を示した。8 月の測定時点では最上階における PM_{2.5} 濃度が局所的に大きく計測されたが、10 月における測定結果に着目すると粒子個数測定結果と同様に 12 階における濃度は 10 階部分よりも低く計測された。そのため 8 月の測定時には最上階において一時的な PM_{2.5} 濃度の上昇があったことが予想できる。

3 つの計測機器により計測された結果から、概して、上層階での汚染濃度増加の傾向が確認された。下層階からの汚染空気の上層階への移流が、上層階での汚染濃度の増加に起因していることが予想される。また、高層ビルの中層付近では堅穴区画と室間の差圧の正負が入れ替わる中性帯となり、上層階、下層階と比較して換気回数が低くなることにより CO₂ 濃度、粉じん濃度が局所的に上昇したと考えられる。

なお、今回実測の対象とした建物では室内の CO₂ 濃度を基準とした自動換気制御システムが利用されている。室内の CO₂ 濃度が一定を上回った際には自動的に室内の換気が行われる。そのため、今回計測された結果にもその影響が及んでいる可能性がある。

表 2-2-1 実測時 (10/20, 1/15) の
各室の在室人数

the Number of People in Each Room		
Floor	20-Oct	15-Jan
12	79	70
10	78	77
8	62	86
6	76	72
5	91	78
4	96	87

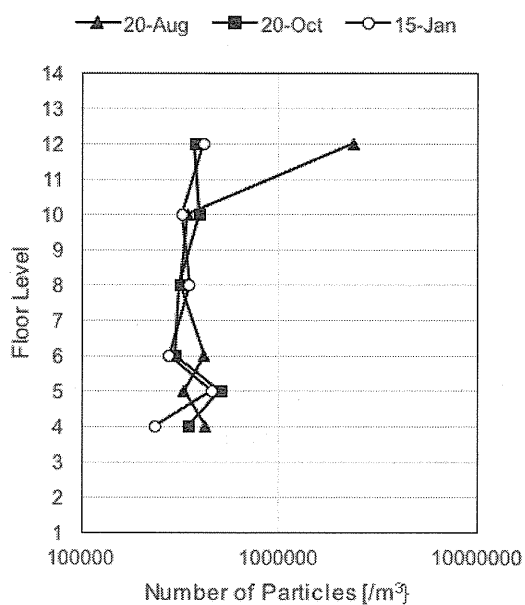


図 2-2-12 測定階と 1m³あたりの
粒子個数の関係

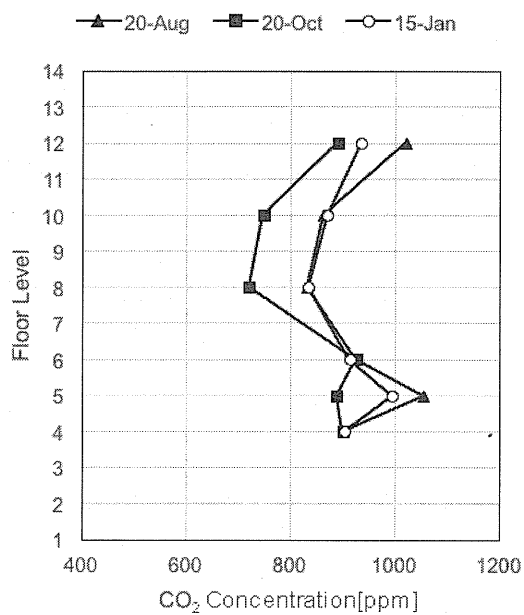


図 2-2-11 測定階と二酸化炭素濃度の関係

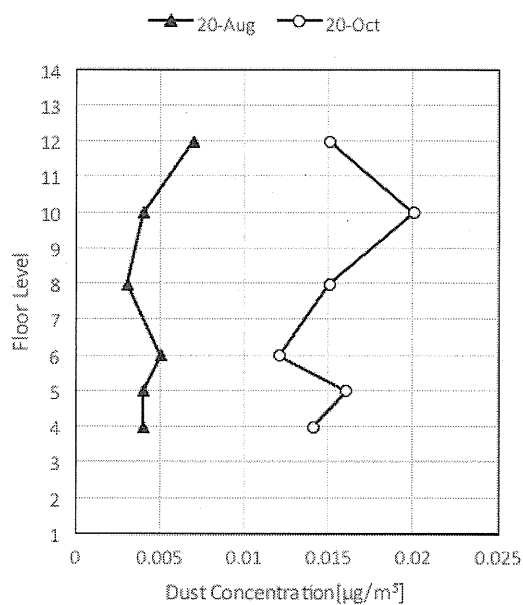


図 2-2-13 測定階と粒子濃度の関係

D.まとめ

東京都の立ち入り検査時の空気環境測定結果及び事務所ビルにおける実測調査より、煙突効果による上層階での空気質悪化の可能性を検討した結果、上層階での汚染濃度増加の傾向が確認され、下層階からの汚染空気の上層階への移流が、上層階での汚染濃度の増加が示唆された。

E.参考文献

- 1) 早川真, 戸河里敏: 煙突効果現象の解明と各種障害への対応: 高層事務所建物の煙突効果の研究(その1), 日本建築学会計画系論文報告集, 第387号, 42-52, 1988
- 2) 四宮直人, 高田暁, 牛尾智秋: 高層ビル全体の換気性状の予測に関する研究, 38th Symposium on Human-Environment System, 33-36, 2015
- 3) 諏訪好英: 高層建築物における煙突効果(原因と対策技術), 日本機械学会熱工学コンファレンス2014講演論文集, 2014
- 4) 古城雄一, 諏訪好英, 矢部周子: 煙突効果による隙間風の実測と換気回路網計算の比較(その1) 竪穴の扉圧力差と風量の実測, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 677-678, 2013