2021/3/25

大田区施設（３箇所）内の換気状況調査結果

慶應義塾大学理工学部応用化学科　教授　奥田知明

1. 調査概要

2020 年 7 月 11 日に大田区民プラザ大ホール､および 8 月 1 日にアプリコと文化の森ホールにおいて、舞台およびホール内の換気状況の調査を行った。具体的には、ホール内でスモーク発生装置を使用して微粒子を発生させ、複数地点に設置した粒子計測装置により空気中の微粒子数濃度を計測し、粒子数の減少速度より劇場内の換気状態を推定した。以降、3 箇所の施設について順に結果を示す。

2. 今回の実験の限界（問題点）

ホール内は空間的に非常に広いため、CO_2 等のガストレーサーを用いた場合と比較して、トレーサー粒子は空間的に不均一のまま移流拡散をしている条件である（ただし、ウイルスは粒子であるため、今回のようなトレーサー粒子を用いた実験の方が、より現実に近い条件であった可能性はある)。測定装置数も限られているため、劇場内の全ての空間における粒子の挙動を追跡できているわけではない。今回は粒子濃度以外の諸条件（空調吹出口や吸込口における実風量など）の測定は行っていない。

3. 大田区民プラザ大ホール

(a) 換気設備

舞台系統	容積　6,069 m^3	空調風量 34,000 m^3/h	理論換気回数 5.6 回/h
客席系統	容積　5,077 m^3	空調風量 30,000 m^3/h	理論換気回数 5.9 回/h
		（外気量 12,500 m^3/h	理論換気回数 2.5 回/h）
合計	容積 11,146 m^3	空調風量 64,000 m^3/h	理論換気回数 5.7 回/h
		（外気のみ考慮した場合	理論換気回数 1.1 回/h）

舞台系統 給気/還気 (SA/RA)　　上給気→下還気（天井→床）のみ

客席系統 給気/還気 (SA/RA)　　上給気→下還気（天井→床前面×２＋後方面）のみ

(b) 実験装置

煙粒子発生装置：Rosco 1600 + Fog Liquid (Standard)

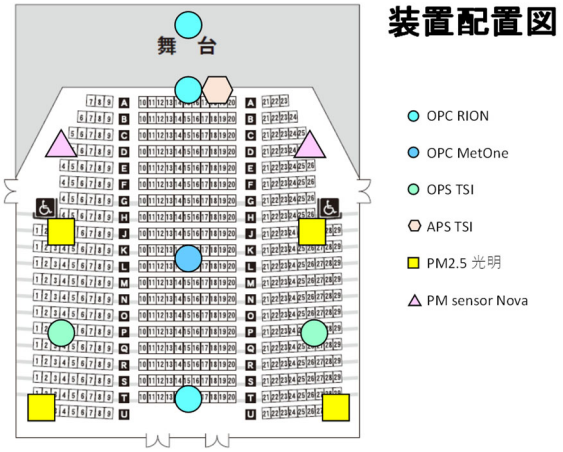
光散乱式粒子計数器（OPC, RION KC-01E）	流量 0.5 L/min, 粒径 0.3～10 μm
光散乱式粒子計数器（OPS, TSI 3330）	流量 1.0 L/min, 粒径 0.3～10 μm
光散乱式粒子計数器（OPC, MetOne3313）	流量 28.3 L/min, 粒径 0.3～10 μm
空気動力学粒径分布測定器（APS, TSI3321）	流量 5.0 L/min, 粒径 0.5～20 μm

PM2.5 濃度計（光明理化学工業, PMT-2500）

PM2.5 sensor（Nova SDS011）

(c) 測定箇所（右図参照）

舞台	OPC
客席最前列中央 B-15	OPC, APS, PM2.5 計
客席前列下手側 D-6	PM sensor
客席前列上手側 J-26	PM sensor
客席中列中央 L-15	OPC (MetOne)
客席中列下手側 P-4	OPS
客席中列上手側 P-26	OPS
客席後列中央 T-15	OPC
客席後列下手側 U-1	PM2.5 計
客席後列上手側 U-29	PM2.5 計



(d) 実験パターン

はじめに、空調を OFF にしたでスモークを舞台上から発生させ、ホール全体に行き渡らせた後、空調を ON にした。次に、緞帳を降ろしてスモークを発生させ、舞台からの粒子の移動の様子を調べた。さらに客席（F-9 と F-10 の間）において粒子を発生させ、粒子の挙動を調べた。次の Table 1 に、各回の測定における実験条件を示す。以下、各回の測定についてはこの Table 1 に記載の名称で記載する。

Table 1　実験条件

測定	#1	#2	#3	#4
スモーク位置	全体	舞台（緞帳あり）	客席	舞台（緞帳なし）

(e) 実験結果

今回の計測結果を 1 枚の図として Fig. 1 にまとめた。舞台上でスモークを発生させてホールに行き渡らせてから空調を ON にした#1 の条件においては、粒子は空調 ON と同時にほぼ一様に減少した。緞帳を下げた#2、空調を ON にしたまま舞台上でスモークを発生させた#4 についても、粒子はホール全体に届いていたが、客席前方と比較すると後方の席における粒子濃度はやや小さかった。客席からスモーク粒子を発生させた#3 では、下手側 F-9 付近から舞台側に向けてスモークを発生させたにもかかわらず、粒子は前方や舞台ではなくむしろ後方に多く流れた。

PM2.5 計による粒子減衰速度の測定結果を基に算出したホール内の換気回数は 19.9～24.4 回/h であった。この換気回数を、汚染物質の半減期で表現すると、約 2 分となる。これは OPC の測定結果を用いた場合も同様であった。これは換気設備から計算される理論換気回数 1.1 回/h と比較してかなり大きかった。これは、空調機に装備されているフィルターの粒子低減効果が有効に機能していることを示していると考えられる。トレーサーとして粒子を用いた場合、CO_2 ガスを用いた場合と比較して換気速度が速く見える傾向があることに注意する必要はあるものの、総じて、**大田区民プラザ大ホールの換気状態は良好であったと言える。**

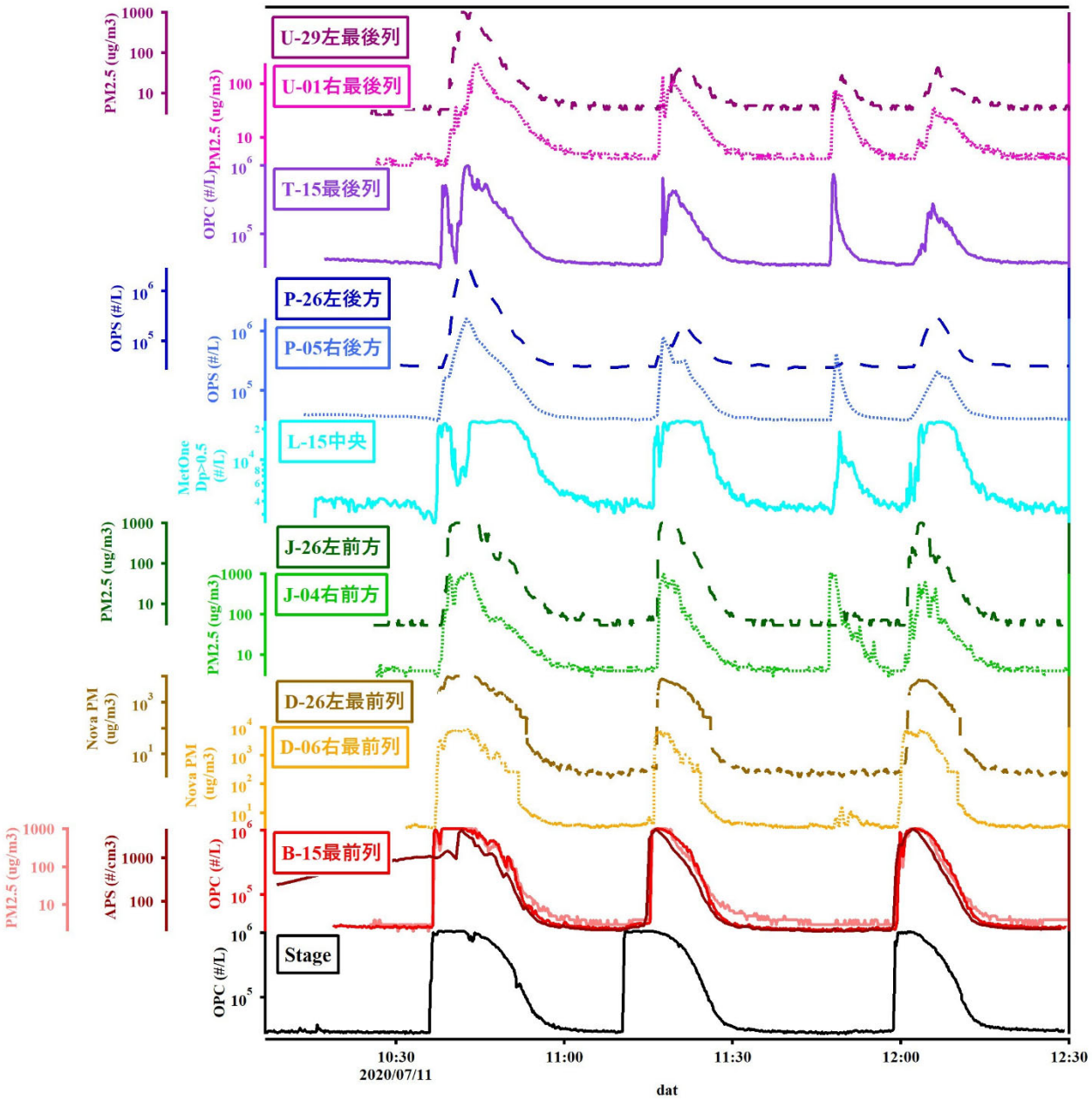


Fig. 1 大田区民プラザ大ホールにおける換気状況調査（粒子発生→減衰）結果一覧（2020/7/7 実施）

(f) 参考写真

Fig. 2 舞台上でスモークを発生させ、大田区民プラザ大ホール全体に行き渡らせている様子

Fig. 3 客席最前列に設置した測定機材

4. 大田区民ホール・アプリコ大ホール

(a) 換気設備

舞台系統	容積 15,594 m^3	空調風量 15,000 m^3/h（ただし舞台系統に外気導入なし）	
（スノコ）	容積 4,325 m^3	空調風量 15,000 m^3/h	
客席系統 1F	容積 14,661 m^3	空調風量 41,100 m^3/h	（外気量 12,600 m^3/h）
1F 後方		空調風量 7,200 m^3/h	（外気量 2,000 m^3/h）
2F		空調風量 37,300 m^3/h	（外気量 14,100 m^3/h）
合計	容積 34,580 m^3	空調風量 115,600 m^3/h	（外気量 28,700 m^3/h）
		理論換気回数 3.3 回/h	（外気のみ考慮 0.83 回/h）

客席のみ合計
外気量 28,700 m^3
外気のみ考慮
換気回数 2.0 回/h

舞台系統 給気/還気 (SA/RA)　上給気→下還気（天井→床）のみ

客席系統 給気/還気 (SA/RA)　上給気→下還気（天井→床＋壁）のみ

※実験装置および測定箇所は省略

(b) 実験結果

今回は粒子の減衰が遅かったため、実験は 1 回のみ行った。まず客席最前列における結果を Fig. 4 に示す。PM2.5 計による粒子減衰速度の測定結果を基に算出したホール内の換気回数は 1.4～1.8 回/h であった。また、OPC による粒子減衰速度の測定結果を基に算出したホール内の換気回数は 0.88～1.7 回/h であった。これは外気導入量を考慮した換気設備から計算される理論換気回数 0.83 回/h とほぼ同等であった。これは、空調機に装備されているフィルターの粒子低減効果が顕著には確認できなかったことを示していると考えられる。なお、この状態における換気回数を、汚染物質の半減期で表現すると、約 24～47 分となる。なお、後述の CO_2 を用いた換気量調査の結果からも、換気回数 0.79～0.96 回/h であることが確認されている。

総じて、<u>大田区民ホール・アプリコ大ホールの換気状態は、設備設計通りの空調風量が確保されているといえる。より一層の換気状況の向上を目指すには、空調機内フィルターの状況を踏まえ、必要に応じて清掃・交換などについて検討することも考えられる。</u>

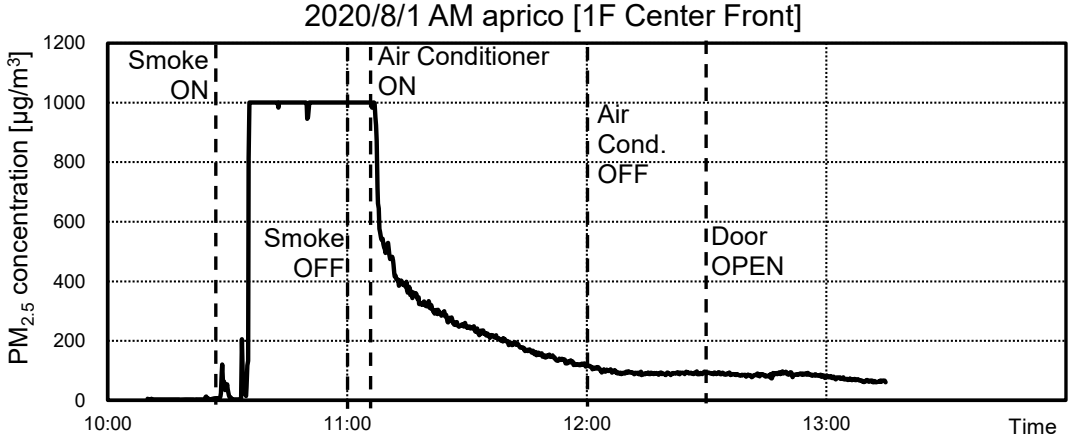


Fig. 4 大田区民ホール・アプリコ大ホールにおける換気状況調査（粒子発生→減衰）結果（客席最前列）

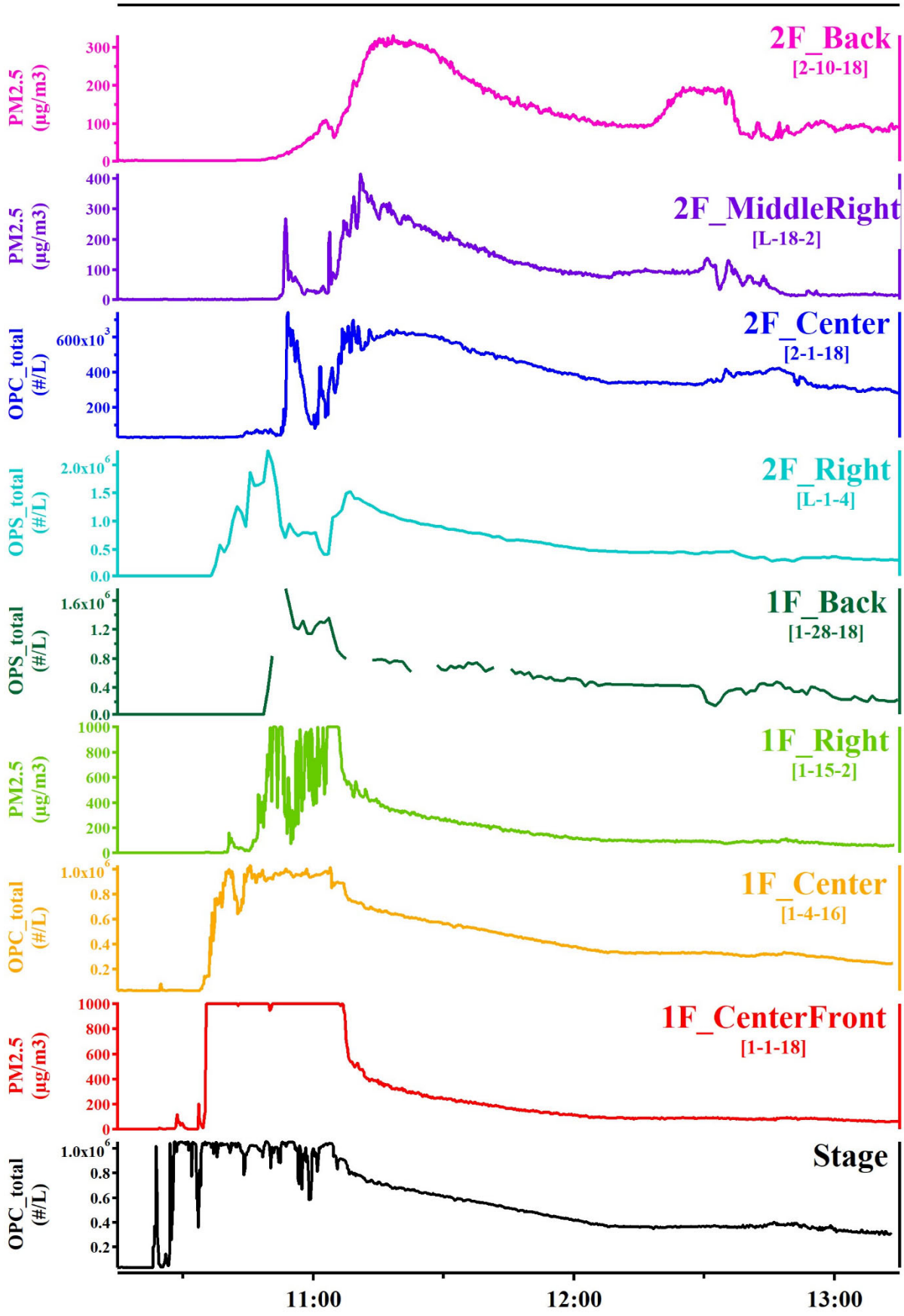


Fig. 5 大田区民ホール・アプリコ大ホールにおける換気状況調査（粒子発生→減衰）結果（2020/8/1 実施）

Fig. 6 大田区民ホール・アプリコ大ホールにおける換気状況調査の様子

5. 大田区文化の森 大ホール

(a) 換気設備

舞台系統	容積 1,717 m^3	空調風量 10,750×2 m^3/h	（外気量 10,750×2 m^3/h）
客席系統	容積 1,328 m^3	空調風量 15,000 m^3/h	（外気量 7,600 m^3/h）
合計	容積 3,045 m^3	空調風量 36,500 m^3/h	（外気量 29,100 m^3/h）
		理論換気回数 12.0 回/h	（外気のみ考慮 9.6 回/h）

舞台系統 給気/還気 (SA/RA)　袖給気→袖還気　のみ

客席系統 給気/還気 (SA/RA)　上給気→下還気（天井→床＋壁）のみ

※実験装置および測定箇所は省略

(b) 実験結果

アプリコに続いて同日の午後に実施したため、実験は 1 回のみ行った。まず客席最前列における結果を Fig. 4 に示す。PM2.5 計による粒子減衰速度の測定結果を基に算出したホール内の換気回数は 4.8～5.4 回/h であった。これは外気導入量を考慮した換気設備から計算される理論換気回数 9.6 回/h と比較すると小さい値となった。これは、空調機に装備されているフィルターの粒子低減効果があまり有効に機能していないことを示しているが、設備上の外気取り入れ量が多いため、換気そのものの状態は良好であると言える。なお、この状態における換気回数を、汚染物質の半減期で表現すると、約 9 分となる。

総じて、<u>大田区文化の森大ホールの換気状態は良好であるが、可能であれば空調機内のフィルターの状態などを確認し、必要に応じて交換などの改善を検討しても良いと考えられる。</u>

6. CO2 濃度による換気状態シミュレーション

(a) 理論

在室者から一定速度で発生する CO_2 が、一定量の換気空気と完全混合されるモデルを仮定すると、室内の CO_2 濃度の時間変化は次式で与えられる。なお各パラメータの定義は Fig. 8 内に示した。

$$C - Co = G/Q\ (1 - e^{-(Q/V)t}) \times 10^6\ [ppm]$$

(b) シミュレーション

この考え方を基に、今回調査した 3 箇所について実際の条件を入力した。換気回数は実測値と設備上の理論値の小さい方を入力し、容積と定員は資料通りとした。その結果、今回調査した中では最も換気状態が懸念されたアプリコ大ホールの場合で、定常状態になった時の CO_2 濃度は約 1,300 ppm であり、また 1 人当たりの換気量は 19.4 m^3 と推定された。これは CO_2 濃度についてはビル管理法等で定める基準の 1,000 ppm をやや上回り、また 1 人当たりの換気量についても建築基準法の 20 m^3/h を下回ったものの、実際にクラスター感染が起こったケース（同約 10,000 ppm、4 m^3/h）と比較するとそれほど深刻な懸念を必要とするものではないと思われる。

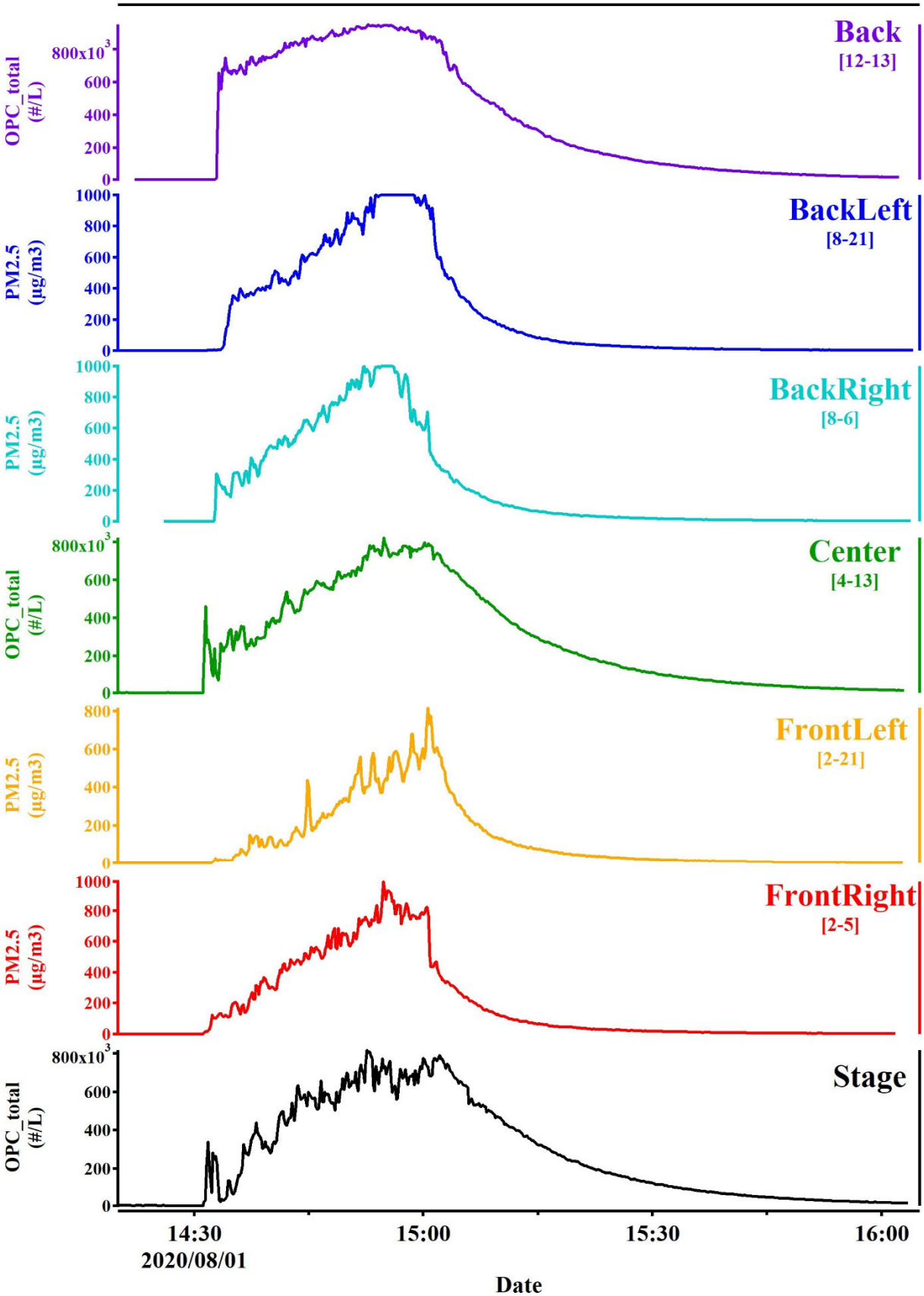
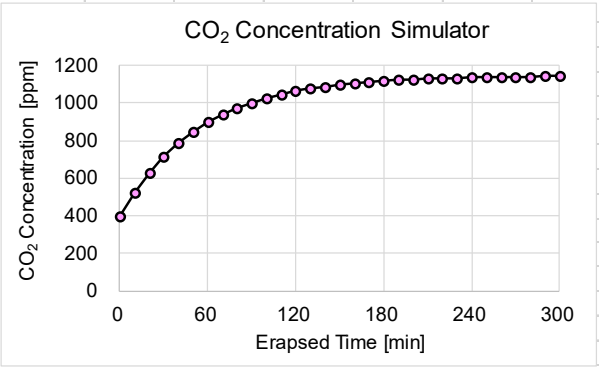


Fig. 7 大田区文化の森大ホールにおける換気状況調査（粒子発生→減衰）結果（2020/8/1 実施）

※数値や考え方の原典は、日本産業衛生学会(2020)「換気シミュレーター ver 1.0」

C	1145	ppm	室内CO2濃度		
Ce	46000	ppm	呼気中CO2濃度		
Co	400	ppm	外気中CO2濃度		
G	9.13146	m3/h	CO2発生量（在室者合計）		
k	1.0	-	平均活動量係数	k	説明
m	1.10	回/h	換気回数	1	平時
n	509	人	全在室者数	2	発言の多い会議
Q	12260.6	m3/h	換気量	3	ラジオ体操
R	0.39	m3/h	1人当たりの呼気量	5	スポーツ一般
t		h	経過時間		
V	11146.0	m3	部屋の容積		
Q/n	24.1	m3/人	1人当たりの換気量		
		ここに入力			

CO2の目安：1,000 ppm（ビル管理法、労働安全衛生法）、1,500 ppm（学校保健法）
Q/n の目安：20 m3/h（建築基準法）、30 m3/h（空気調和・衛生工学会規格）

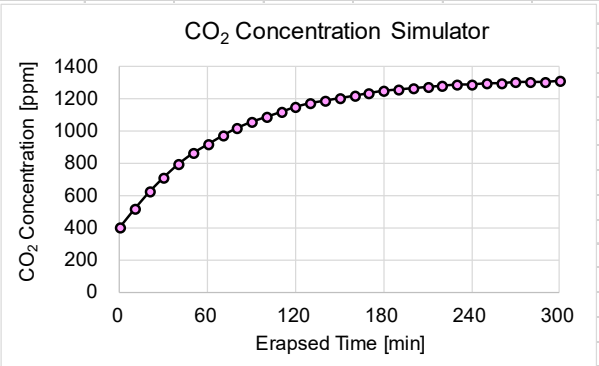


大田区民プラザ大ホールに
509人（定員の100%）

※数値や考え方の原典は、日本産業衛生学会(2020)「換気シミュレーター ver 1.0」

C	1323	ppm	室内CO2濃度		
Ce	46000	ppm	呼気中CO2濃度		
Co	400	ppm	外気中CO2濃度		
G	26.49738	m3/h	CO2発生量（在室者合計）		
k	1.0	-	平均活動量係数	k	説明
m	0.83	回/h	換気回数	1	平時
n	1477	人	全在室者数	2	発言の多い会議
Q	28701.4	m3/h	換気量	3	ラジオ体操
R	0.39	m3/h	1人当たりの呼気量	5	スポーツ一般
t		h	経過時間		
V	34580.0	m3	部屋の容積		
Q/n	19.4	m3/人	1人当たりの換気量		
		ここに入力			

CO2の目安：1,000 ppm（ビル管理法、労働安全衛生法）、1,500 ppm（学校保健法）
Q/n の目安：20 m3/h（建築基準法）、30 m3/h（空気調和・衛生工学会規格）

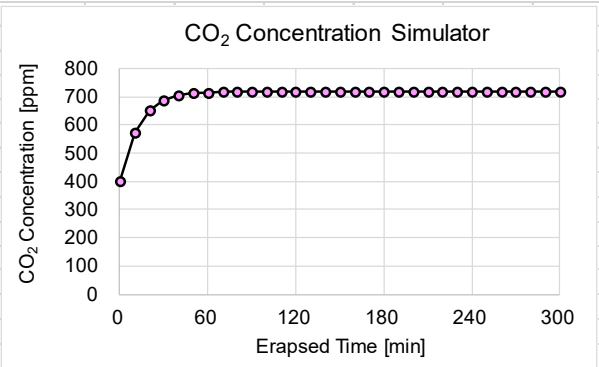


大田区民ホール・アプリコ大ホールに
1,477人（定員の100%）

※数値や考え方の原典は、日本産業衛生学会(2020)「換気シミュレーター ver 1.0」

C	718	ppm	室内CO2濃度		
Ce	46000	ppm	呼気中CO2濃度		
Co	400	ppm	外気中CO2濃度		
G	4.64646	m3/h	CO2発生量（在室者合計）		
k	1.0	-	平均活動量係数	k	説明
m	4.80	回/h	換気回数	1	平時
n	259	人	全在室者数	2	発言の多い会議
Q	14616.0	m3/h	換気量	3	ラジオ体操
R	0.39	m3/h	1人当たりの呼気量	5	スポーツ一般
t		h	経過時間		
V	3045.0	m3	部屋の容積		
Q/n	56.4	m3/人	1人当たりの換気量		
		ここに入力			

CO2の目安：1,000 ppm（ビル管理法、労働安全衛生法）、1,500 ppm（学校保健法）
Q/n の目安：20 m3/h（建築基準法）、30 m3/h（空気調和・衛生工学会規格）



大田区文化の森大ホールに
259人（定員の100%）

C-Co = (G/Q) (1 - exp(-(Q/V)t) × 10^6
t=∞のとき、C = [G/Q × 10^6] + Co
G = Ce × n × R × k × 10^-6 = n × k × 0.01794

Fig. 8 換気シミュレーションによる CO_2 濃度の変化と、用いた計算式およびパラメータの各種条件

7. 大田区民ホール・アプリコ大ホール【追加調査１】

(a) 換気設備

省略

(b) 実験装置

PM 関連と測定箇所は省略

CO_2 発生方式：ドライアイス 100 kg を粉砕し散布、サーキュレーター 6 台稼働

CO_2 濃度計（T&D, TR-76Ui）（Fig. 9）　・CO_2 センサ：NDIR（非分散型赤外線吸収法）

・温度センサ：サーミスタ（測温抵抗体）　・湿度センサ：高分子膜抵抗式

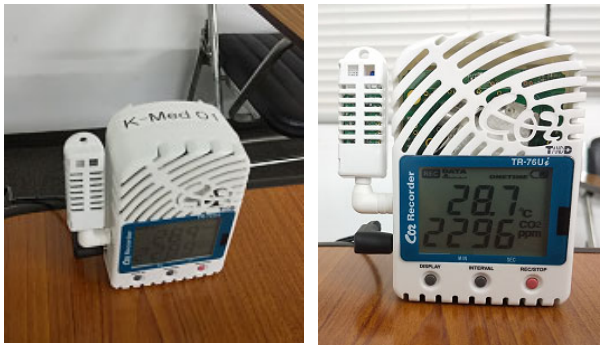


Fig. 9 測定に用いた CO_2 濃度計

(c) 実験結果

この調査では CO_2 とスモーク粒子をトレーサーとして同時に用いて、それぞれの濃度の減衰から換気速度の推定を行った。CO_2 濃度の減衰を指数関数近似した定数（＝換気回数［回／時間］）を計算したところ、0.79～0.96 回／時間となった。これは外気導入量を考慮した換気設備から計算される理論換気回数 0.83 回/時間 とほぼ同等であった。すなわち、アプリコ大ホールでは、換気回数は設備能力通りであることが確認された。次に、OPC による粒径 0.3～0.5 μm の粒子減衰速度の測定結果を基に算出したホール内の換気回数は 0.83～0.97 回/h であった。また、PM2.5 計による粒子減衰速度の測定結果を基に算出したホール内の換気回数は 1.4～1.8 回/h であった。今回の調査結果の傾向は、先述の 2020/8/1 の調査結果と類似していた。従って、本追加調査における結論は、前回同様であるが、総じて**大田区民ホール・アプリコ大ホールの換気状態は、設備設計通りの空調風量が確保されているといえる。より一層の換気状況の向上を目指すには、空調機内フィルターの状況を踏まえ、必要に応じて清掃・交換などについて検討することも考えられる。**

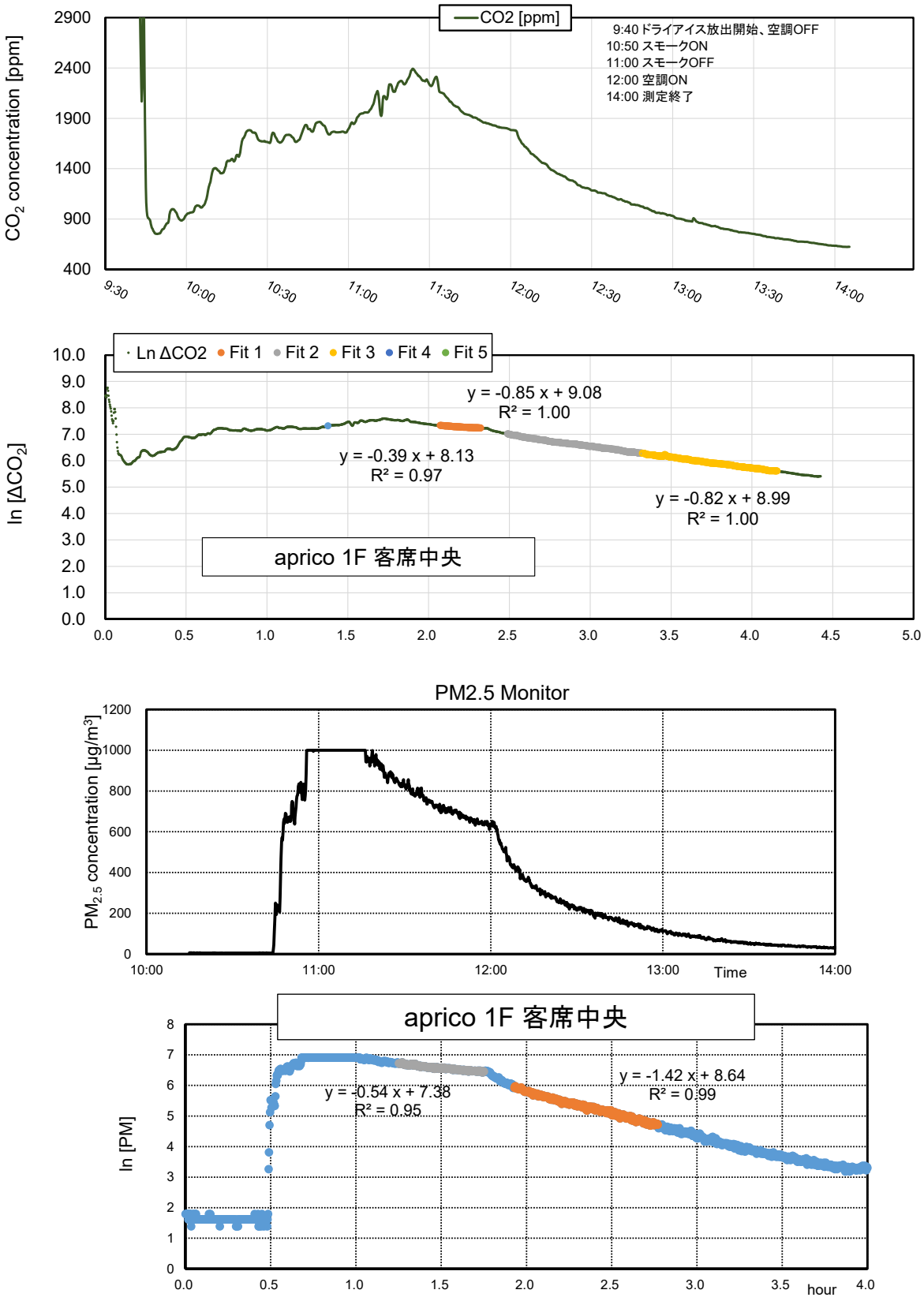


Fig. 10 大田区民ホール・アプリコ大ホールにおける換気状況調査（CO_2＋粒子）結果（2020/11/8 実施）

8. 大田区民ホール・アプリコ大ホール【追加調査２：実際の公演時の CO_2 による換気状況調査】

(a) 調査概要

2020/10/17 に、東京都交響楽団によるコンサートが大田区民ホール・アプリコ大ホールにて開催された。この際に、CO_2 計と PM2.5 計を用いてホール内外の濃度を測定し、実際の使用状態下における換気状況の調査を行った。なお、この時のホール内の人数は、客数、出演者、スタッフ、合計で 471 人であった。調査結果を Fig. 11 に示す。まず PM2.5 濃度であるが、ホール内では非常に清浄な状態が保たれており、むしろホール外の方が粒子濃度が高かった。また、CO_2 濃度は、開演前の約 500 ppm から終演時の 600 ppm まで上昇した。ここで、アプリコ大ホールの設備能力上の換気回数 0.83 回/h を想定し、ホール内人数に実際の数値を入れて CO_2 濃度による換気状態シミュレーションを実施した結果を Fig. 12 に示す。その結果、約 2 時間経過後の CO_2 濃度は約 600 ppm となることが予測される結果となり、これは実測値とほぼ一致した。すなわち、今後はこの CO_2 濃度による換気状態シミュレーターを用いて、実際の利用人数から換気状態を予測することが可能となったと言える。なお先述の通り、<u>アプリコにおいては定員 100% の 1,477 人が利用した際にも、換気量そのものに大きな問題はない</u>ものと思われる。ただし感染症のリスクは換気のみで議論できるものではなく、他の対策も合わせて考える必要があることを申し添える。

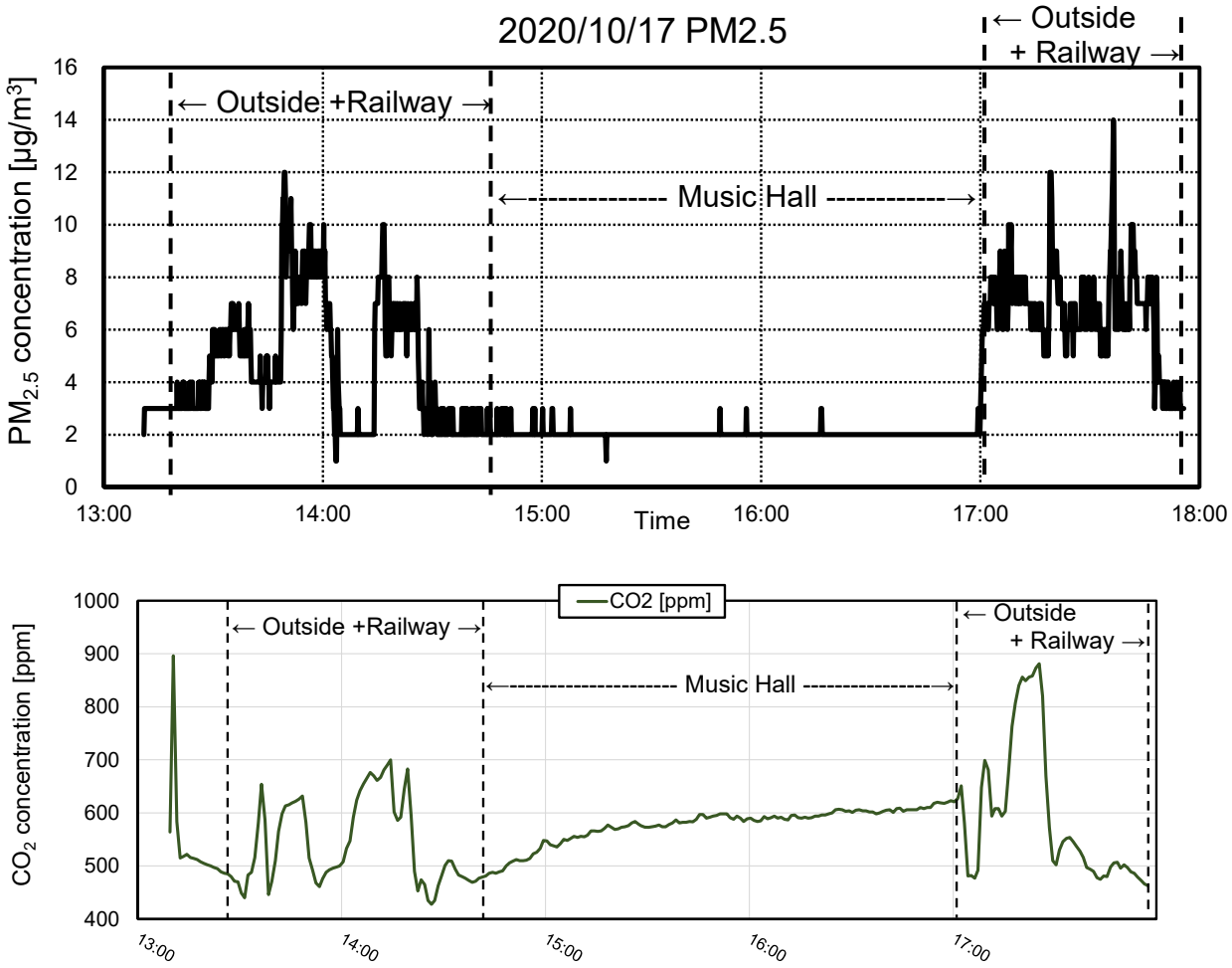
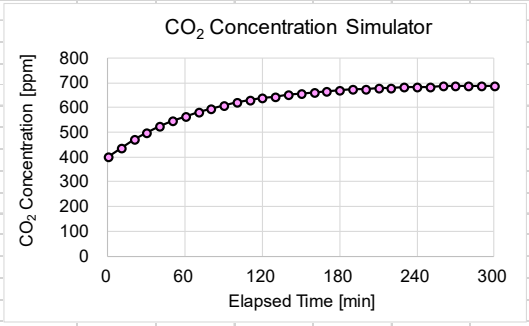


Fig. 11 アプリコ大ホールにおけるコンサート公演時の換気状況調査（粒子＋CO_2）結果（2020/10/17 実施）

※数値や考え方の原典は、日本産業衛生学会(2020)「換気シミュレーター ver 1.0」

C	694	ppm	室内CO2濃度		
Ce	46000	ppm	呼気中CO2濃度		
Co	400	ppm	外気中CO2濃度		
G	8.44974	m3/h	CO2発生量（在室者合計）		
k	1.0	-	平均活動量係数	k	説明
m	0.83	回/h	換気回数	1	平時
n	471	人	全在室者数	2	発言の多い会議
Q	28701.4	m3/h	換気量	3	ラジオ体操
R	0.39	m3/h	1人当たりの呼気量	5	スポーツ一般
t		h	経過時間		
V	34580.0	m3	部屋の容積		
Q/n	60.9	m3/人	1人当たりの換気量		
		ここに入力			

CO2の目安：1,000 ppm（ビル管理法、労働安全衛生法）、1,500 ppm（学校保健法）
Q/n の目安： 20 m3/h（建築基準法）、30 m3/h（空気調和・衛生工学会規格）



大田区民ホール・アプリコ大ホールに
471人（定員の32%）

t [min]	CO2 [ppm]
0	400
10	438
20	471
30	500
40	525
50	547
60	566
70	583
80	597
90	610
100	621
110	630
120	638
130	646
140	652
150	657
160	662
170	666

Fig. 12 換気シミュレーションにて 2020/10/17 アプリコ公演時の実測値を用いて CO_2 濃度を予測した結果

■補足・免責事項

この報告書の内容に基づいた行動の結果いかなる不利益を被ったとしてもそれに対する責任を負うことはできない。感染症のリスクは換気だけで決まるわけではなく、他の対策も同時に取ることが前提である。本稿は 2021/3/25 時点の著者個人の知見に基づいて執筆されており、所属機関やその他の組織の意見を代表するものではない。著者は粒子計測に関しては複数年の経験を持つものの、今回のような建物内の調査を長年専門としてきたわけではない。本報告書には実験事実を示してあるが、その解釈についてはより多くの議論がなされるべきと考える。本報告書が、科学的根拠に基づいた様々な感染症対策を考える上での契機になれば幸いである。

■謝辞

今回の計測では、大田区文化振興協会の皆さまをはじめ、慶應義塾大学 KGRI 実践的メドテックデザインプロジェクト(K-Med)、慶應義塾大学理工学部・新川崎（K^2）タウンキャンパス超実践型人間環境化学社会実装プロジェクトなど多くの関係者にご尽力をいただきました。また粒子計測では慶應義塾大学理工学部助教の岩田歩博士、同大学院生の齋藤克知氏、同学部 4 年生の齊藤響氏に多大なご協力をいただきました。に感謝いたします。ここに記し感謝の意を表します。

以上