

新国立劇場 ホールおよび施設内 換気状況調査 報告書

慶應義塾大学理工学部応用化学科
教授 奥田 知明

2021 年 1 月 12 日

目次

0. 前提事項	2
I. 大劇場オペラパレス	4
II. 中劇場	11
III. 小劇場・リハーサル室	18
IV. その他の実測データ評価	26

0. 前提事項

1. 調査方法の違いと結果の解釈について

本調査では、以下の3つの方法を用いて新国立劇場のホールおよび施設内における換気状況の調査を行った。(1) CO₂ をトレーサーとして大量に発生させ、換気および空調設備を稼働させて CO₂ 濃度の減衰を見ることで換気速度を調査する方法、(2) スモーク粒子を大量に発生させ、換気および空調設備を稼働させて粒子濃度の減衰を見る方法、(3) 施設内の CO₂ 濃度を長時間測定し続けることで、実際の利用状況下における空間の換気状態を推定する方法、である。なお (1)(2) は奥田が実施し、(3) は新国立劇場が実施した。

この3つの方法はそれぞれ換気状況を調査するものであるが、その結果の意味するところはそれぞれで異なる。(1) の CO₂ をトレーサーとして用いる方法では、ある空間に対して外気がどの程度の量と速さで流入してくるか、を見ていることになる。この方法では気体の挙動のみを対象としており、粒子の挙動については何の情報も得られない。次に (2) の粒子をトレーサーとして用いる方法では、空間内にある粒子がどの程度の速さで減衰するかを見ている。この際には、空間内への外気の流入量だけでなく、施設内で空気が循環しているような場合であっても、配管途中にフィルター機能があれば粒子は減衰する。ここで新型コロナウイルス (Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2, SARS-CoV-2) は、ウイルスそのものの粒子サイズとしては 50~200 nm 程度であることが知られている¹⁾²⁾。しかしながら、このウイルスが単独で空気中を浮遊していることはあまり考えられない。これは、ウイルスが人の口から放出される際は、多少なりとも唾液などと一緒に放出され、体液中の塩分やタンパク質などと共存していると考えられるためである。実測データとしては、中国の武漢の病院内における空気中の SARS-CoV-2 は 0.01~10 μm の広い粒径範囲に分布していたが、その存在量のピークはウイルスそのもののサイズとは異なっていた、という報告がある³⁾。別の報告では、SARS-CoV-2 は 1 μm 以下の粒子からは検出されず、存在量のピークは 1~4 μm だったという報告もある⁴⁾。また、人の口から放出される粒子のうち、すぐに落下などにより環境表面に付着せずに空気中を浮遊することにより新型コロナウイルス感染症の伝播に寄与していると考えられる粒径は 3 μm 前後という推定結果がある⁵⁾。つまり、新型コロナウイルス感染症への対策としての換気を考える際には、数 μm 前後の粒径を持つ粒子の挙動を見ることは重要である。しかし、これまで建物内の換気を議論する際は、粒子の挙動は考慮されてこなかった。従って、一般に「換気回数」と言えば、それは実験的には (1) に準ずる方法で測定された値を指す。今回の新型コロナウイルス感染症への対策としての換気を考える際には、(1)(2) のどちらの方法で見ることが正しいかの回答を現時点で示すことは容易ではない。しかしながら、少なくとも (2) は (1) よりも速い換気回数を与える ((2) で見ている粒子の減衰速度は、(1) で見ている外気の取り入れ量を含んでいる) ため、まずは可能な限り (1) の方法で得られた数値を用いた方が「安全側」の議論となる。その上で、(2) の方が今回の調査目的からすれば実態に近いことを考慮しながらデータを見ていただくと幸いである。

(3) の方法は、実用上は非常に有用であると考えられる。(1)(2) の方法はそれぞれ実験時限りの数値であり、また実際の利用状況を反映していない、という点を考慮すべきである。同じ CO₂ を用いた調査であっても、(1) と (3) の結果が異なることは不思議ではない。(1) で得られたデータを施設自体の換気能力の基礎データとして抑えた上で、実際の運用時の換気状況は (3) により把握する、という使い方が

望ましいものと思われる。

- 1) Ke, Z. et al. (2020) *Nature*, doi:10.1038/s41586-020-2665-2.
- 2) Chen, N. et al. (2020) *Lancet* 395: 507–13, doi: 10.1016/S0140-6736(20)30211-7.
- 3) Liu, Y. et al. (2020) *Nature* 582, doi: 10.1038/s41586-020-2271-3.
- 4) Chia, P.Y. et al. (2020) *Nature Communications* 11, 2800, doi: 10.1038/s41467-020-16670-2.
- 5) Prentiss, M., et al. (2020) *MedRxiv*, doi: 10.1101/2020.10.21.20216895 (preprint).

2. 換気回数 [回/h] と、一人当たりの換気量 [$\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{人}$] について

空間の換気状況の表現には何通りかがあり、換気回数 [回/h] や、一人当たりの換気量 [$\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{人}$] がそれに相当する。空間の換気回数は、その空間容積分の空気（外気）が 1 時間あたりに何回その空間に流入するかを表す値である。換気回数は、その空間単独で考えた際の換気状態を表しており、そこに何名の人間が居るか、ということは考慮されていない。また、同じ換気回数であっても、空間の容積が 10 倍大きい時は外気の取り入れ量が 10 倍となっているため、換気回数は空間の容積と合わせて考える必要がある。

これに対して、汚染源が人間である場合、例えば人間の呼気に新型コロナウイルスが含まれていることを想定する場合、空間内にいる人数を考慮して、一人当たりの換気量を考えることが重要である。したがって、新型コロナウイルス感染症対策としての換気を考える場合、空間の基本的な設備性能と言える換気回数を把握した上で、実際の利用者数を考慮した一人当たりの換気量を用いて議論すべきと考えられる。本報告書で言えば、前者が (1)、後者が (3) に相当する。

実際の基準値も、利用者数を考慮した一人当たりの換気量についての値となっており、建築基準法 ($20 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{人}$) や空気調和・衛生工学会規格 ($30 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{人}$) などがある。この数字が大きいほど、いわゆる「換気が良い」状態と言える。したがって、空間の換気状況について複数の表現がなされていた場合は、換気回数よりもむしろ実際の利用者数を考慮した一人当たりの換気量を重要視すべきであると言える。

I. 新国立劇場オペラパレス内の換気状況調査結果

3. 調査結果要約

2020年7月7日に、新国立劇場のオペラパレス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、劇場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。緞帳を下ろした舞台上でスモークを発生させ、緞帳を上げたときの粒子の流れを測定したところ、粒子は舞台から直接客席1Fへ流れるのではなく、舞台と客席との境界で上方に移動した。粒子の計測結果より換気回数を計算すると、0.3-0.5 μm の粒子で 6.7 回/時間、2-5 μm の粒子で 8.7 回/時間となった。これは空調設備能力から推測される換気回数よりも大きいことから、空調配管系に設置されているフィルターが有効に機能していることが示された。オペラパレス内の測定地点のうち、最も換気状態が劣っていたのは舞台上ギャラリー3Fであったが、そこでも粒子濃度が 1/10 になるまでに掛かる時間は約 20 分であり、舞台上ではそれが 30 秒～3 分程度であった。なお紗幕は舞台上の粒子が客席側に移動するのを防ぐ効果が多少あると思われる。総じて、新国立劇場オペラパレスの換気状態は良好であったと言える。

4. 調査概要

2020年7月7日に、新国立劇場のオペラパレスにおいて、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、劇場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。スモークの発生位置は舞台上またはオーケストラピット内とし、ホールの換気設定を変更して（上吹きだし→下吸い込み、およびその逆）、粒子濃度の変化を計測した。粒子計測装置はホール内の舞台中央付近、オーケストラピット、舞台上ギャラリー3階下手側、客席1階前方、客席4階下手側の5箇所に設置した。実験は、8つの異なる条件につき、順次設定を変えながら実施した。

はじめは緞帳を下ろした舞台上でスモークを発生させ、緞帳を上げたときの煙の流れを測定し、紗幕の有無、換気設定（空気の流れが床→天井、またはその逆）を変えて4パターンで実験を行った。次に、緞帳は完全に上げた状態でオーケストラピット上でスモークを発生させた時について、ピット深さおよびピットと客席間の手すりの有無、換気設定を変えて4パターンで実験を行った。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	舞台 1	舞台 2	舞台 3	舞台 4	ピット 1	ピット 2	ピット 3	ピット 4
換気設定	天井→床	天井→床	床→天井	床→天井	床→天井	床→天井	天井→床	天井→床
紗幕	なし	あり	なし	あり	-	-	-	-
手すり	-	-	-	-	あり	なし	あり	なし
ピット	-	-	-	-	浅い	深い	浅い	深い

5. 実験条件

(a) 換気設備

舞台系統	容積 58,549 m ³	空調風量 97,700 m ³ /h	理論換気回数 1.67 回/h
客席系統	容積 13,939 m ³	空調風量 122,000 m ³ /h	理論換気回数 8.75 回/h
合計	容積 72,488 m ³	空調風量 219,700 m ³ /h	理論換気回数 3.03 回/h
外気取り入れ	50%	外気風量 101,600 m ³ /h	理論換気回数 1.40 回/h

フィルター プレフィルター＋中性能フィルター

舞台系統 給気/還気 (SA/RA) 下給気→上還気 (床→天井) のみ

客席系統 給気/還気 (SA/RA) 通常：上給気→下還気 (天井→床) のみ、ただし逆も可

(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

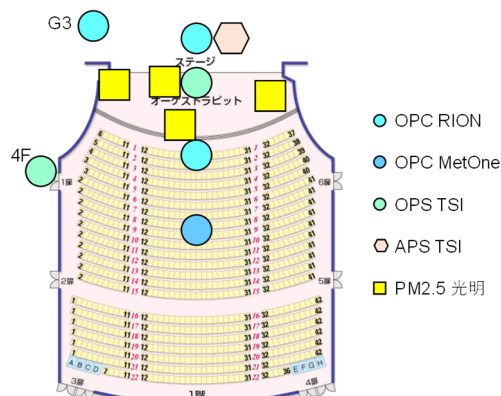
光散乱式粒子計数器 (OPC, MetOne3313) 流量 28.3 L/min, 粒径 0.3～10 μm

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)

(c) 測定箇所 (右図参照)

舞台	OPC, APS
オーケストラピット	OPS, PM2.5 計
G3 (舞台上 3F 下手側)	OPC
客席 1 階 1 列目中央 1-22	OPC
客席 1 階 1 列目中央 9-22	OPC(MetOne)
客席 4 階下手側 L1-1	OPS



(d) 今回の実験の限界 (問題点)

今回は現場測定のためバックグラウンド空気を清浄化していない、すなわち空気中にすでに相当数の粒子が存在している状態での計測である。また、劇場内は空間的に非常に広いため、CO₂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。また本稿は 2021/1/12 時点の著者個人の知見に基づいて執筆されており、実験事実が変わることはないが、今後新たな知見や情報が加わるにより見解等が変わることはあり得る。

6. 今回の実験結果一覧

今回の計測結果を1枚の図として Fig. 1 にまとめた。

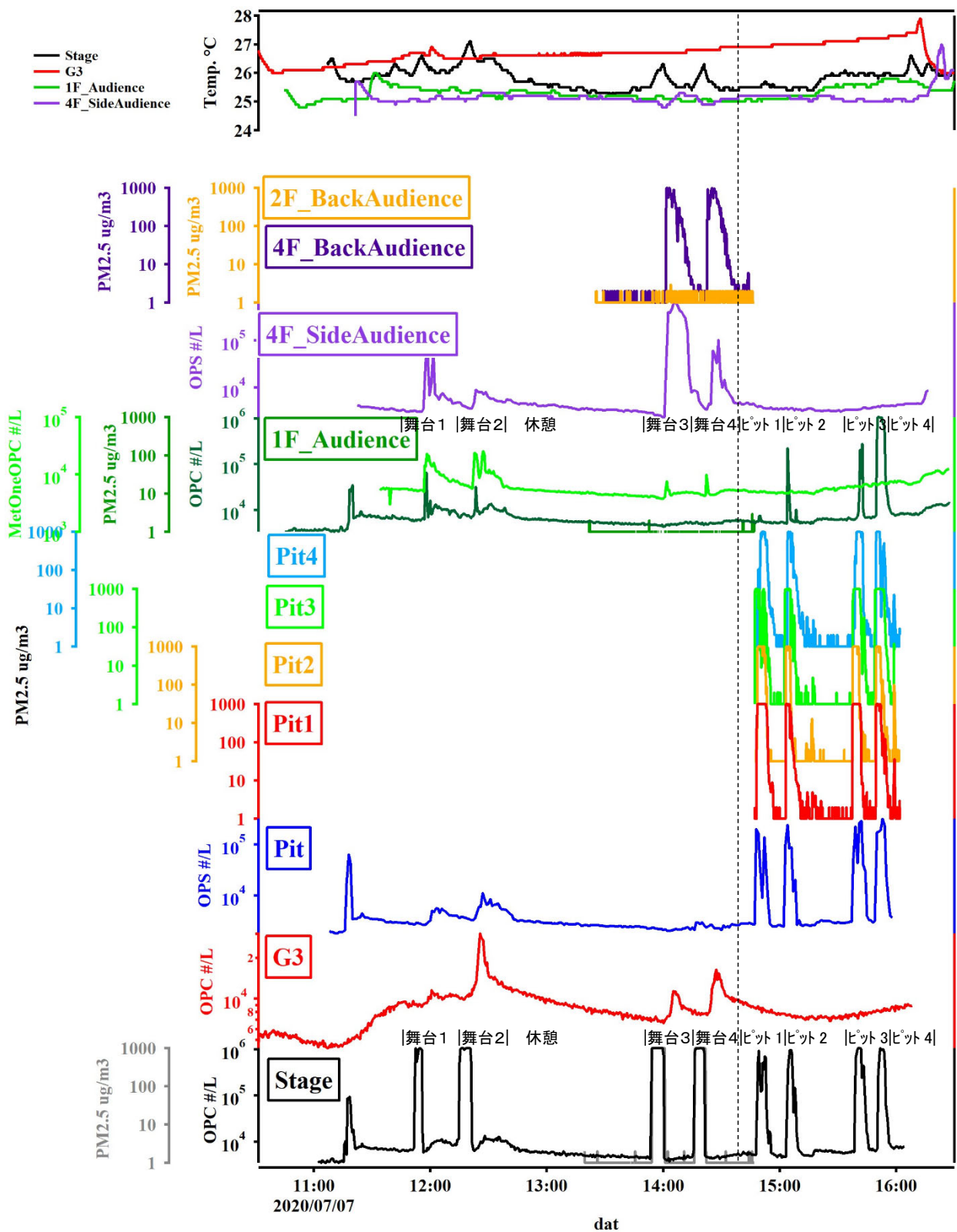


Fig. 1 新国立劇場オペラパレスにおける換気状況調査(粒子発生→減衰)結果一覧(2020/7/7 実施)

まず室温については、舞台側が客席側よりも常に高い状態であった。また客席 1F と 4F では、ほぼ同じか、1F の方が 4F よりもやや高い状態であった。次に粒子の減少速度であるが、最も遅い、つまりオペラハウス内で最も換気状態が劣る場所は、舞台 3F のギャラリー G3 であると思われる。他の全ての地点での換気速度は、G3 に比べれば速いと言える。そこで本稿ではまず G3 の換気速度についてまとめ、次いで別の箇所につき論点ごとに整理して記載した。

7. 舞台上 G3（ギャラリー3F 下手側）における換気状況

〔舞台 2〕条件開始後の G3 地点における粒子濃度の変化を Fig. 2 に示す。0 秒から 420 秒まで緞帳を降ろしてスモークを溜めており、420 秒の時点で紗幕を降ろしたまま緞帳を上げたものである。緞帳を上げた時点から粒子濃度は徐々に上がり始め、840 秒頃を頂点にしてそこから減少を始めた。その後は約 1,000 秒、つまり 17 分ほど掛かって元の粒子濃度レベルまで戻っているように見える。Fig. 2 には 4 つの粒径（粒子サイズ）毎にその挙動を示したが、ここに示した範囲では粒子のサイズ毎に顕著に挙動が異なることはなかった。つまり、一般によく「 $5\text{ }\mu\text{m}$ 以下の粒子は空気中を浮遊する」と言われるが、今回の結果は、粒径 $5\text{ }\mu\text{m}$ 以下の粒子であれば、劇場内を浮遊する挙動は粒子のサイズによらずほぼ同じとみなせることを示している。この粒子の減少挙動を指数関数的減衰とみなした際のプロットと近似曲線を Fig. 3 に示す。この結果からも、 $0.3\text{--}0.5\text{ }\mu\text{m}$ と $2\text{--}5\text{ }\mu\text{m}$ の減衰挙動はほぼ同様であることが言える。この減衰曲線より換気回数を計算すると、 $0.3\text{--}0.5\text{ }\mu\text{m}$ の粒子で 6.7 回／時間、 $2\text{--}5\text{ }\mu\text{m}$ の粒子で 8.7 回／時間となった。これは空調設備能力から推測される換気回数よりも大きいことから、空調配管系に設置されているフィルターが有効に機能していることが示された。この換気回数について別の表現をすると、実験時の粒子濃度が 1/10 になるまでの時間は、 $0.3\text{--}0.5\text{ }\mu\text{m}$ および $2\text{--}5\text{ }\mu\text{m}$ で約 20 分であった。つまり、今回の調査において、オペラパレス内で最も換気状況が劣る G3 地点であっても、約 20 分で粒子濃度は 1/10 になることが示された。

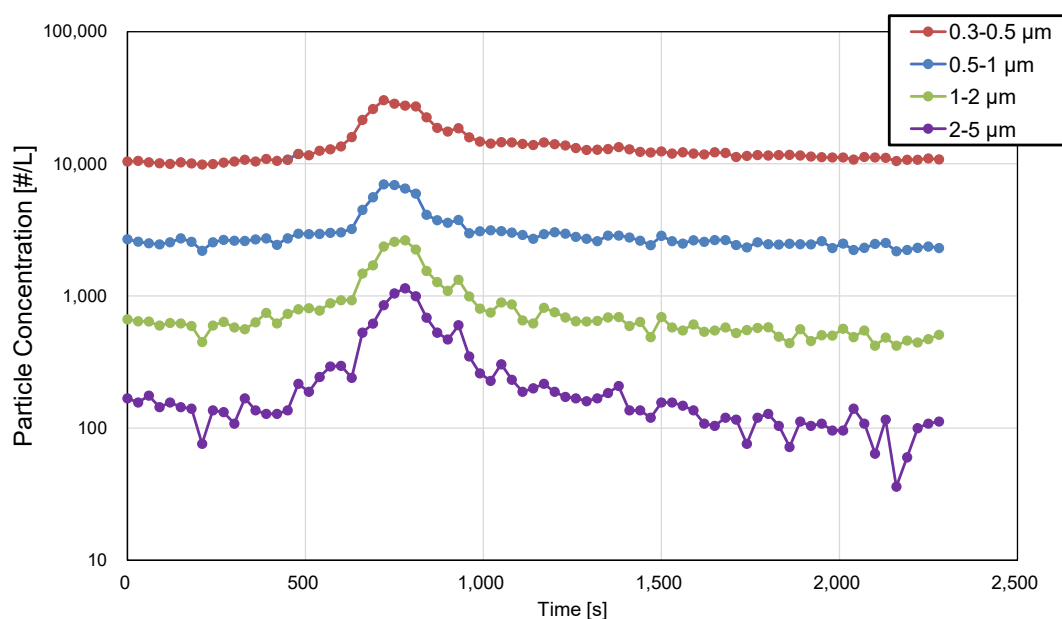


Fig. 2 [舞台2条件] G3 での粒子濃度の変化

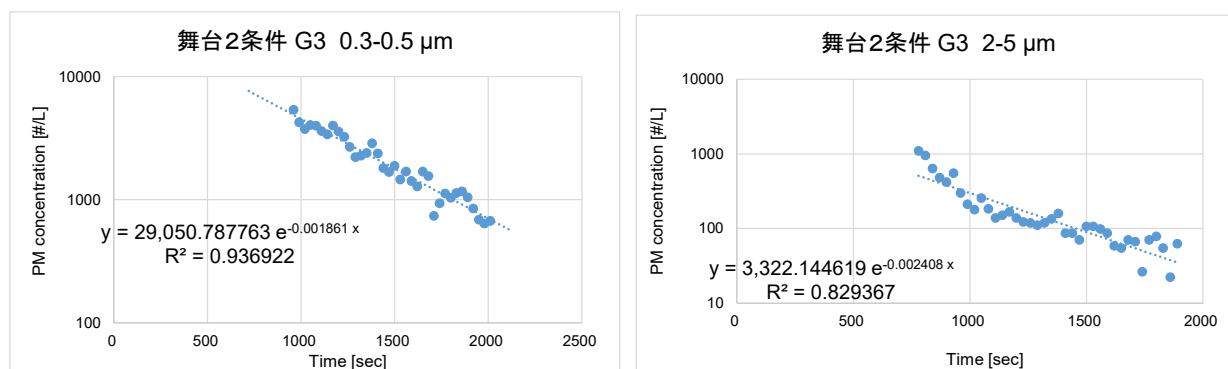


Fig. 3 [舞台2条件] G3 での粒子濃度の変化(縦軸はバックグラウンド濃度を引いた後の粒子濃度を示す)

8. [舞台1] と [舞台2] の比較 (客席側換気設定は天井→床, 紗幕有無の比較, 図は Fig. 1 参照)

[舞台1] では、舞台上でスモークを溜めてから緞帳を上げると、まずスモークは舞台の上方から客席側へゆっくり移動した。舞台中央における粒子の減少は極めて速く、粒子濃度が減少し始めてから粒子発生前の粒子濃度レベルに戻るまでは約1分であった。その後、粒子濃度がバックグラウンドの約2倍まで上昇する時間帯があったが、約20分後には元の粒子濃度に戻っていた。オーケストラピットは舞台と隣接しているにもかかわらず粒子濃度の上昇は遅く、緞帳を上げてから約8分後に、粒子濃度がバックグラウンドの約2倍まで上昇した程度であった。客席最前列では、緞帳を上げてから約2分後に粒子濃度が約10倍になったが、その2分後にはほぼ元の濃度レベルに戻った。その後はスモーク発生前の2倍程度の粒子濃度が続いたが、10分後には元の濃度レベルに戻った。客席中央9列目では、緞帳を上げてから約2分後に粒子濃度が約5倍になり、元の濃度レベルに戻るまで約20分を要した。客席4F下手側最前列では、緞帳を上げてから3分後に粒子濃度が約20倍となり、5分ほどでバックグラウンドの約2倍まで減少したものの、そこからさらに元の粒子濃度レベルに戻るまでは約30分を要した。

[舞台2] では、基本的には、[舞台1] と同様の挙動を示したが、紗幕が下りているため、舞台上で発生させたスモークが長時間舞台上に残っている様子が見てとれた。これに伴い、舞台上方のG3での粒子濃度が高くなっていたため、[舞台1] では客席側に流れていた粒子が舞台側空調の還気側に流れていたと思われる。特に客席4Fでは、紗幕が下りていたことにより[舞台2]における粒子濃度のピークは[舞台1]の約1/10になった。

9. [舞台1] と [舞台3] の比較 (客席側換気設定が 天井→床 または 床→天井, Fig. 1 参照)

[舞台3] では客席側換気設定を 床→天井 として実験を行った。この設定では、舞台上でスモークを溜めてから緞帳を上げると、舞台上から客席側にスモークがかなり速く移動していった。特に客席4Fにおける影響が顕著に見られ、スモーク発生直後の舞台中央と同程度の粒子濃度が極めて高い状態が約10分続いた。これは、客席側還気が上方となったことに伴い、空気流に乱れが生じ、高濃度の粒子がホール上部で滞留したためと思われる。4階席への影響が大きくなった一方で、1F中央9列目において粒子濃度が約2倍になりその後2分以内に元に戻ったほかは、2階席以下の客席やオーケストラピットでは粒子濃度の増加がほとんど見られなかった。

10. [舞台3]と[舞台4]の比較（客席側換気設定が 床→天井, 紗幕有無の比較, Fig. 1 参照）

[舞台4]では紗幕を下ろして実験を行った。客席 4F 最前列下手側における影響が軽減されたものの、客席 4F 中央では[舞台3]と同様の顕著な粒子濃度の上昇が見られた。これ以外の場所においては、[舞台3]と[舞台4]での大きな違いは見られなかった。

11. [ピット1～4]の比較（客席側換気設定が 天井→床 または 床→天井, ピット深さと手すりの有無の比較, 図は Fig. 1 参照）

ここからはオーケストラピット内にてスモークを発生させた。まず、いずれの条件でも、粒子濃度が減少しはじめてからバックグラウンドの粒子濃度レベルに戻るまでは約5分であった。ピットの深さや手すりの有無は、ピットにおける粒子濃度の減少に影響を与えていないように見えた。これにより、オーケストラピット内で粒子が発生したとしても、それは5分以内に速やかにピット外に移動することが示された。客席への影響は、客席 1F 最前列中央の場所のみ設定による違いが見られ、[ピット1]つまり換気設定が床→天井、ピット浅、手すり有の条件がもっとも影響が小さく、[ピット4]つまり換気設定が天井→床、ピット深、手すり無の条件では顕著に粒子濃度が上昇した。

12. 参考写真



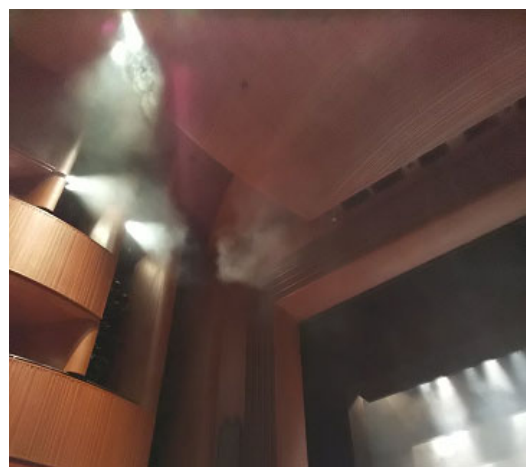
▲舞台上でのスモーク発生の様子



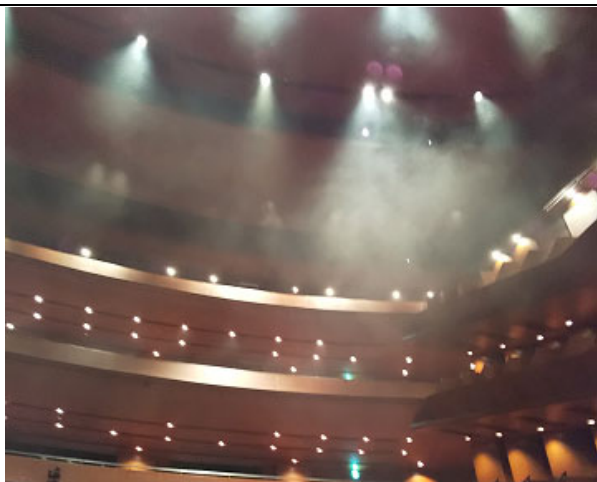
▲舞台に設置の計測装置類



▲[舞台1] 緞帳を上げた直後



▲[舞台1] 緞帳を上げた1分後



▲ [舞台 1] 緞帳を上げた 2 分後



▲ [舞台 3] 緞帳を上げた 2 分後



▲ [ピット 1]



▲ [ピット 1]



▲ [ピット 2]



▲ [ピット 4]

II. 新国立劇場中劇場内の換気状況調査結果

1. 調査結果要約

2020年7月23日に、新国立劇場の中劇場において、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、劇場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簡易的な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。舞台上で発生させたスモーク粒子は、その多くが舞台上方へ流れ、客席側にはあまり行かなかった。舞台を客席側に張り出したセッティングにしても、基本的な粒子の挙動は同様であった。粒子濃度が1/10になる時間は最長で5.2分であった。粒子の計測結果より換気回数を計算したところ、[午前1]で20.6回/時間、[午前2]で30.4回/時間となった。これは空調設備能力から推測される換気回数よりも大きいことから、空調配管系に設置されているフィルターが有効に機能していることが示された。総じて、新国立劇場中劇場の換気状態は良好であったと言える。

2. 調査概要

2020年7月23日に、新国立劇場の中劇場において、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、劇場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簡易的な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。スモークの発生位置は舞台上または客席内とし、午前と午後で劇場内のセッティングを変更して調査を行った。粒子計測装置は舞台上ギャラリー3階下手側、客席1階前方4列目中央10-41席、客席1階前方4列目下手側10-25席、および客席2階下手側2-22の4箇所に設置した。

午前中はオーケストラピットが下がった状態での舞台上でスモークを発生させて風量75%および100%の条件、および風量を75%に戻してオーケストラピットでのスモーク発生を行った。午後はずっと風量75%のまま、オーケストラピットを上げて舞台を前方まで張り出し、客席前方4列目が最前列になる状態で、舞台上でスモーク発生を行った。また試みとして、客席に向かってスモークを発生させた時の様子も調べた。

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	午前1	午前2	午前3	午後1	午後2	午後3	午後4
スモーク発生場所	舞台上	舞台上	オケピット	舞台上	客席	舞台上	舞台上
風量	75%	100%	75%	75%	75%	75%	75%
スモーク時の緞帳	下→上	下→上	-	-	-	-	下→上

3. 実験条件

(a) 換気設備

舞台系統	容積 46,428 m ³	空調風量 85,200 m ³ /h	理論換気回数 1.84 回/h
客席系統	容積 9,291 m ³	空調風量 84,000 m ³ /h	理論換気回数 9.04 回/h
合計	容積 55,719 m ³	空調風量 169,200 m ³ /h	理論換気回数 3.04 回/h
外気取り入れ	50%	外気風量 65,050 m ³ /h	理論換気回数 1.17 回/h
フィルター	プレフィルター＋中性能フィルター		

舞台系統 給気/還気 (SA/RA) 下給気→上還気 (床→天井) のみ
客席系統 給気/還気 (SA/RA) 上給気→下還気 (天井→床) のみ

(b) 実験装置

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

PM2.5 濃度計 (光明理化学工業, PMT-2500)

(c) 測定箇所 (右図参照)

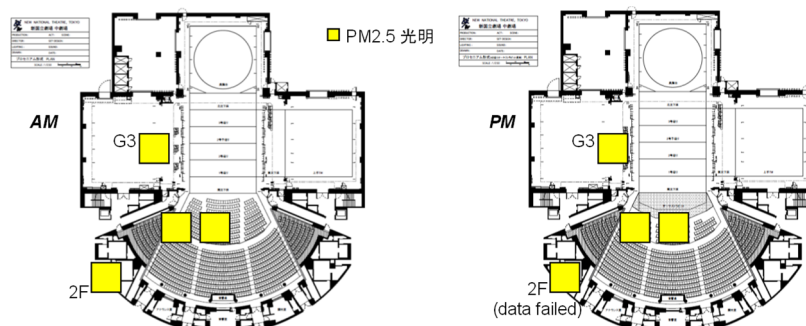
G3 (舞台上 3F 下手側)

客席 1 階前方 4 列目中央 10-41 席

客席 1 階前方 4 列目下手側 10-25 席

客席 2 階下手側 2-22

(2 階席は午後データ取得失敗)



(d) 今回の実験の限界 (問題点)

今回は現場測定のためバックグラウンド空気を清浄化していない、すなわち空気中にすでに相当数の粒子が存在している状態での計測である。また、劇場内は空間的に非常に広いため、CO₂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。また本稿は 2020/11/7 時点の著者個人の知見に基づいて執筆されており、今後新たな知見や情報が加わることにより見解等が変わることはあり得る。

4. 午前中の調査結果概要

新国立劇場中劇場午前中調査における各測定地点の粒子濃度の変化を Fig. 2 に示す。[午前 1] [午前 2] は舞台上でスモークを発生させたものであり、[午前 3] はオーケストラピットでスモークを発生させたものであるが、全ての条件で、1 階席 4 列目の粒子濃度は上昇が見られなかった。2 階席についても [午前 1] の条件でわずかに上昇したが、その他の条件では顕著な粒子濃度の上昇は見られなかった。一方舞台上 3F ギャラリー G3 においては、[午前 1] [午前 2] の条件において顕著な粒子濃度の上昇が

見られた。なお〔午前 2〕の方がピークが小さいが、これは風量の違いに加えて、スモーク発生時間が〔午前 1〕（7 分）に比べて〔午前 2〕（5 分）の方が短かったためと思われる。この粒子数の推移を Fig. 3 に示した。粒子数が 1/10 になる時間は、〔午前 1〕で 3.5 分、〔午前 2〕で 5.2 分であった。粒子の計測結果より換気回数を計算したところ、〔午前 1〕で 20.6 回／時間、〔午前 2〕で 30.4 回／時間となった。これは空調設備能力から推測される換気回数よりも大きいことから、空調配管系に設置されているフィルターが有効に機能していることが示された。

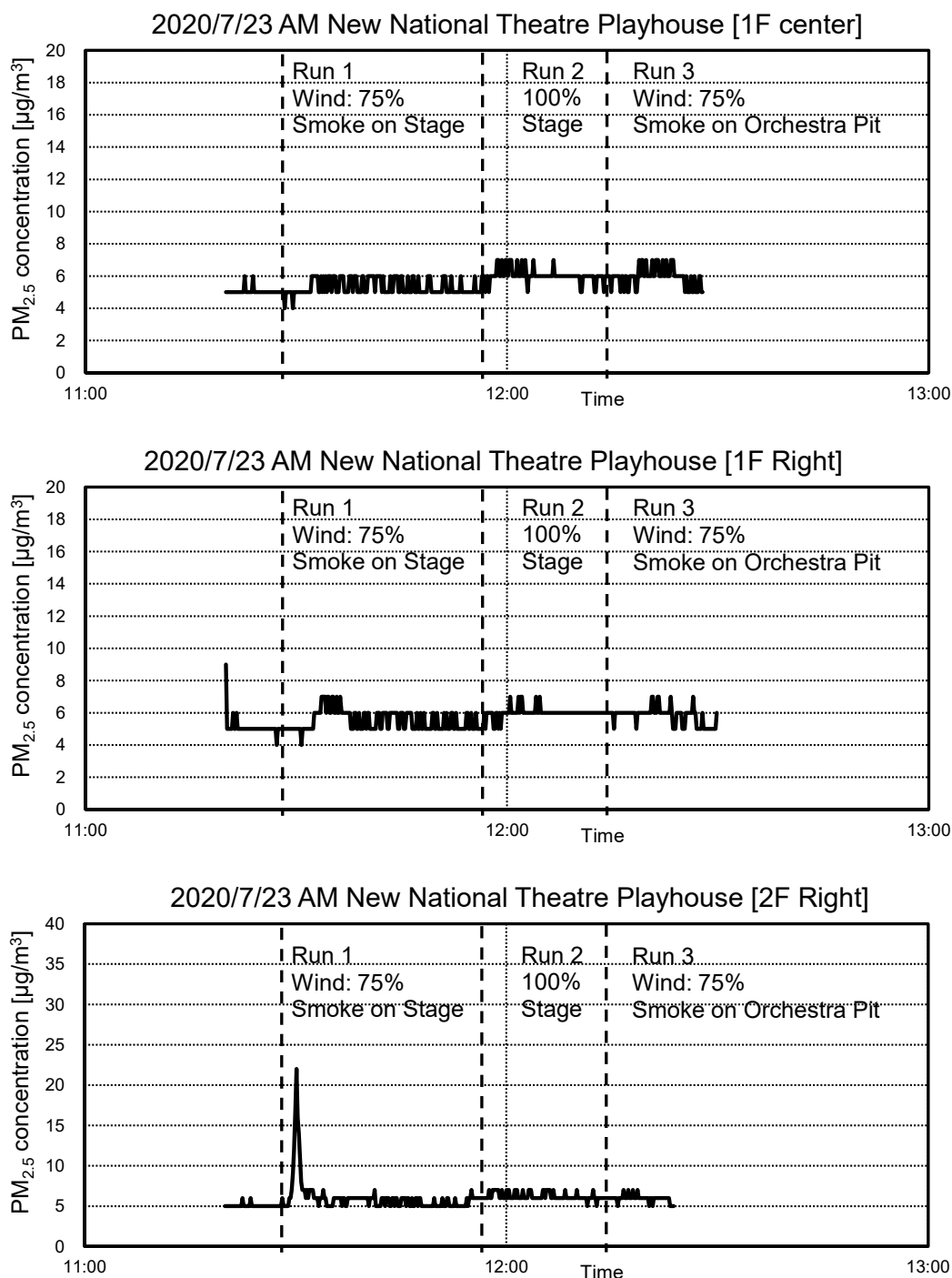


Fig. 2 新国立劇場中劇場午前中調査における各測定地点の粒子濃度の変化(2020/7/23 実施)

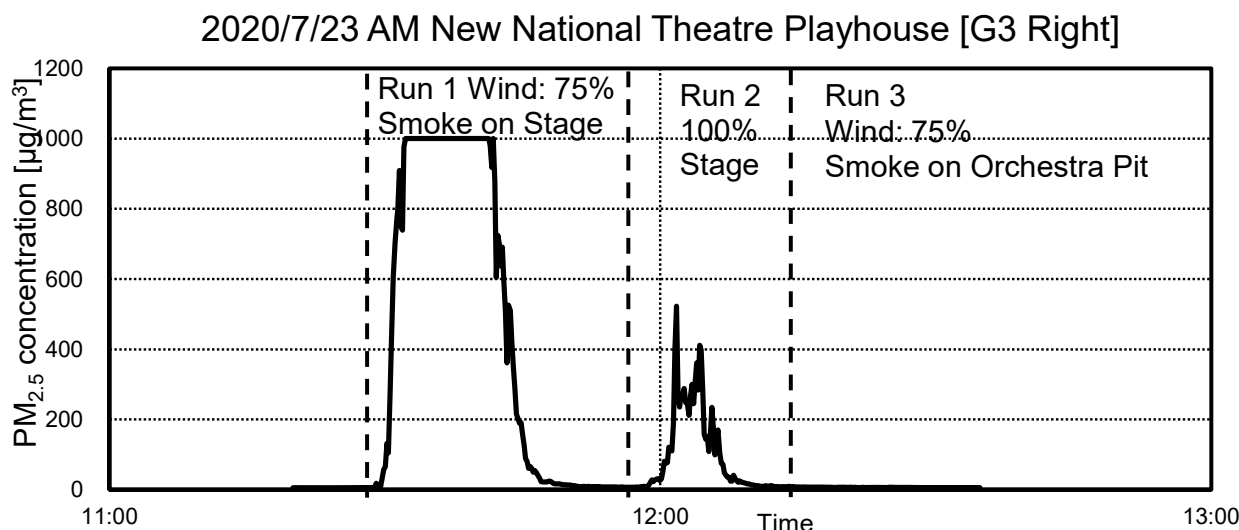


Fig. 2 (続き)

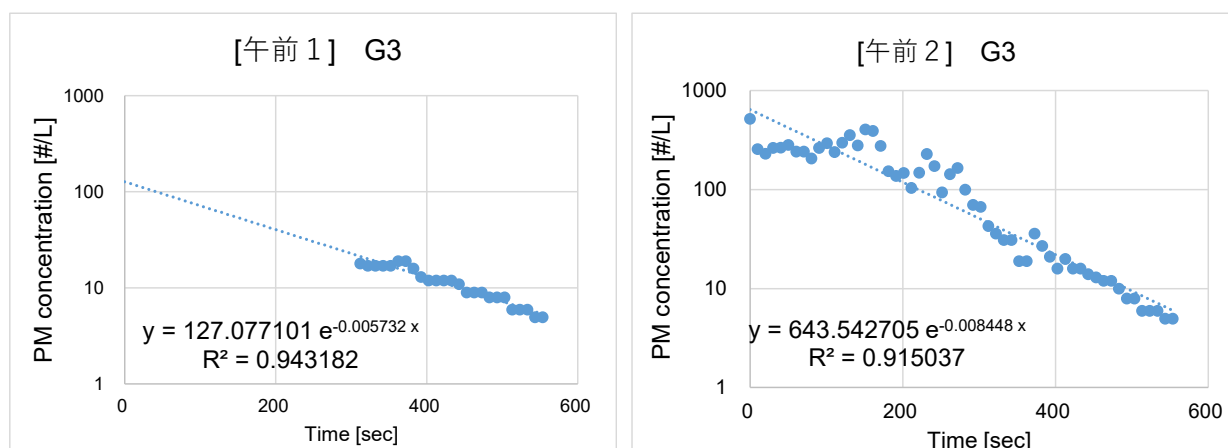


Fig. 3 G3 での粒子濃度の変化(縦軸はバックグラウンド濃度を引いた後の粒子濃度を示す)

5. 午後の調査結果概要

新国立劇場中劇場午後の調査における各測定地点の粒子濃度の変化を Fig. 4 に示す。2 階席の PM_{2.5} 計が機器不調のためデータ取得ができなかった。[午後 1] と [午後 3] は条件としては同一のはずであるが、客席 1F 中央の粒子濃度の挙動は両者でかなり異なっていた。これについては説明が難しいが、スモークを舞台のせり出しの部分で発生させていたため、空間的に均一にスモーク粒子を発生させることが難しかったためと思われる。ただし、いずれにせよ客席 1F 中央における粒子の減衰挙動は [午後 1～3] のそれぞれで類似しており、粒子数が 1/10 になる時間はいずれの場合も約 3 分であった。[午後 4] は緞帳を降ろした状態でスモークを発生させた、つまり [午前 1] と同様の条件だったため、スモーク粒子は舞台側上方に移動し、G3 の粒子濃度が上がったものと思われる。この時、客席側の粒子濃度はわずかに上昇したのみであった。午後のセッティングは舞台が客席側に大きく張り出していたにも関わらず、基本的に舞台側で発生したスモークは客席側には行かず、多くは舞台側に流れた。

以上より、午前・午後、いずれの舞台セッティングにおいても、新国立劇場中劇場の換気状態は良好であったと言える。

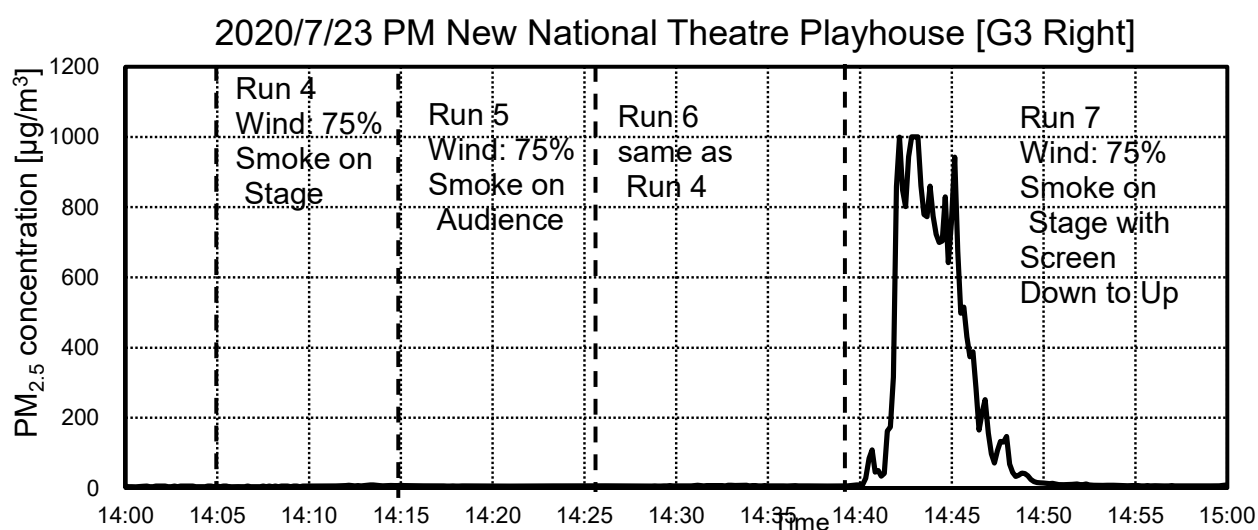
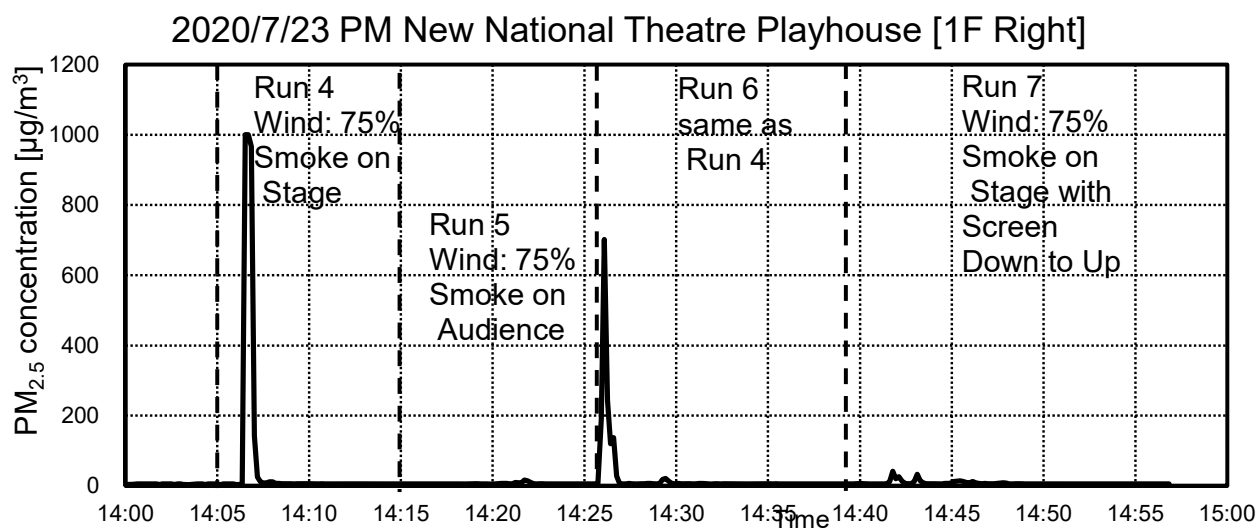
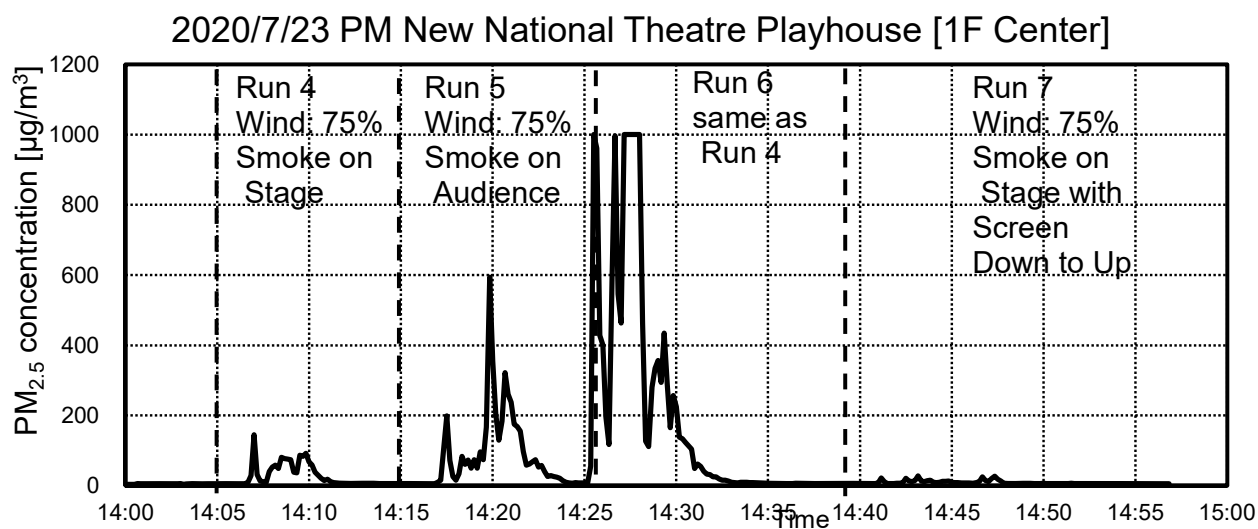


Fig. 4 新国立劇場中劇場午後の調査における各測定地点の粒子濃度の変化(2020/7/23 実施)

6. 参考写真



▲ [午前 1] 緞帳上げた直後



▲ [午前 2] 緞帳を上げた 1 分後



▲ [午前 3] 煙がオケピから舞台に流れている



▲ [午前 3] 客席前方で煙が止まる様に見える



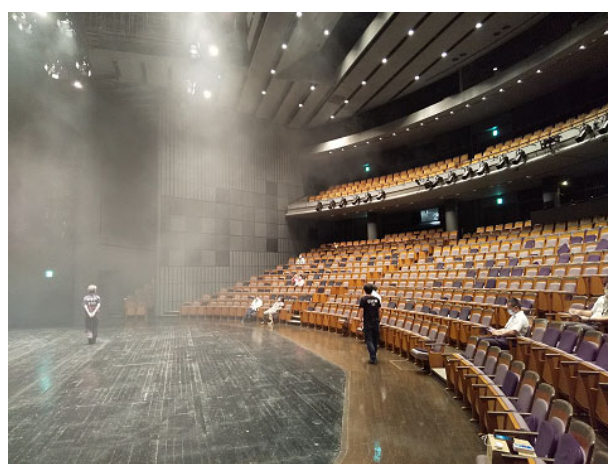
▲ [午後 1] 煙は後方の舞台側に流れている



▲ [午後 2] 客席に向けても煙は後方へ



▲ [午後 3] 客席側に空気の壁があるかのよう



▲ [午後 4] 舞台側と客席側で違いが明らか

III. 新国立劇場小劇場・リハーサル室（A, C, 合唱）内の換気状況調査結果

1. 調査結果要約

2020年8月11日に、新国立劇場の小劇場およびリハーサル室内において、ホール・スタジオ内の換気状況の調査を行った。具体的には、空間内でCO₂ボンベおよびスモーク発生装置を使用してCO₂と微粒子をトレーサーとして発生させ、複数地点に設置したCO₂濃度計測装置および粒子計測装置により空気中の各トレーサー濃度を計測し、それぞれの減少速度より空間内の換気状態を推定した。

2. 調査概要

2020年8月11日に、新国立劇場の小劇場およびリハーサル室内において、ホール・スタジオ内の換気状況の調査を行った。具体的には、空間内でCO₂ボンベおよびスモーク発生装置を使用してCO₂と微粒子を発生させ、複数地点に設置したCO₂濃度計測装置および粒子計測装置により空気中のCO₂濃度および微粒子数濃度を計測し、それぞれの減少速度より空間内の換気状態を推定した。

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 実験場所

測定場所	小劇場	Aリハ	Cリハ	合唱リハ
開始時間	10:30	13:10	14:30	15:30
CO ₂	○	○	○	○
スモーク	○	○	○	○

3. 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

PM2.5 濃度計（光明理化学工業, PMT-2500）

CO₂ 濃度計（T&D, TR-76Ui）

4. 小劇場の調査結果概要

(a) 換気設備

舞台客席系統 容積 5,962 m³ 空調風量 50,000 m³/h 理論換気回数 8.39 回/h
(外気のみ) 50% 外気風量 15,350 m³/h 理論換気回数 2.57 回/h
フィルター プレフィルター＋中性能フィルター

(b) 換気状況調査結果

新国立劇場小劇場調査における各測定地点のトレーサー濃度の変化を Fig. 1 に示す。CO₂ と粒子では減少速度に明らかな違いが見られた。CO₂ の計測結果より換気回数を計算したところ、1.2 回/時間となった。これは空調の外気供給量から推測される換気回数よりも小さかった。一方、粒子の計測結果より換気回数を計算したところ、OPC による 0.3～0.5 μm の粒子の計測結果を用いて最も遅い場合を想定

すると 3.0～7.9 回／時間となり (Fig. 2)、PM2.5 計の結果からは 7.2～38.6 回／時間となった。PM2.5 計は OPC と比較するとより大きい粒子径側の個数濃度を反映していると考えられる。これらの結果はいずれも CO₂ による換気回数の実測値や、空調設備能力から推測される換気回数よりも大きいことから、空調配管系に設置されているフィルターが有効に機能していることが示された。

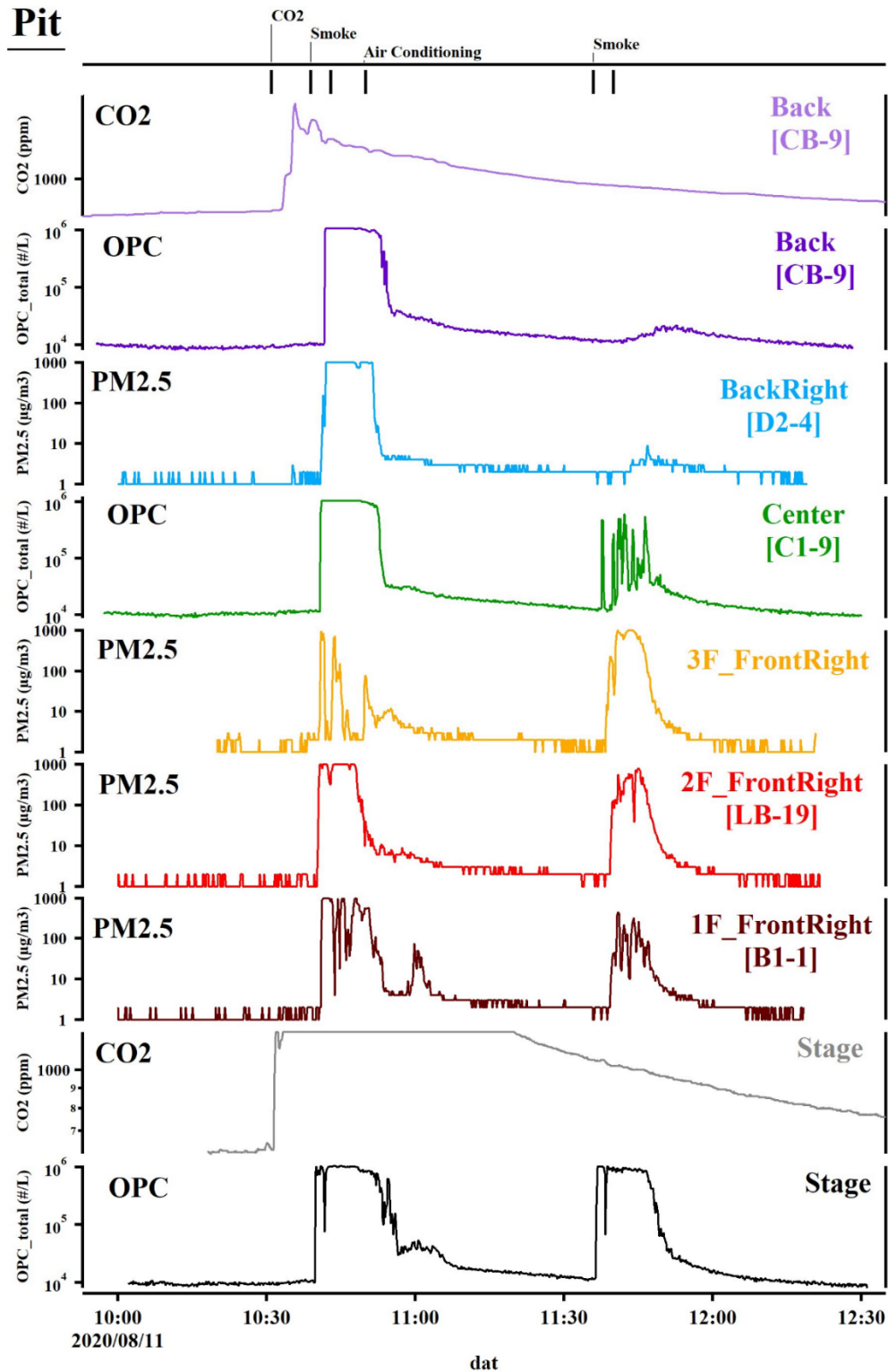


Fig. 1 新国立劇場小劇場調査における各測定地点のトレーサー濃度の変化 (2020/8/11 実施)

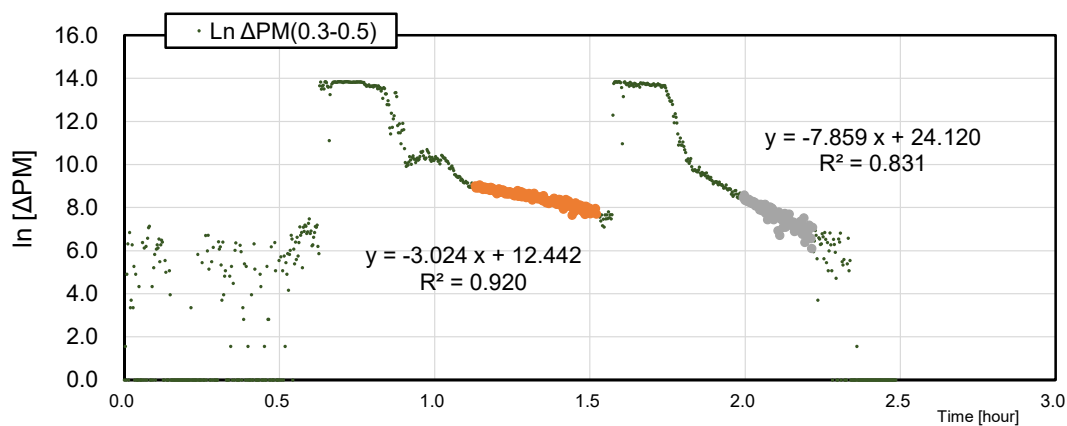


Fig. 2 新国立劇場小劇場調査における測定地点の粒子濃度の変化 (2020/8/11 実施)

5. Aリハーサル室の調査結果概要

(a) 換気設備

舞台客席系統	容積 2,486 m ³	空調風量	15,004 m ³ /h	理論換気回数	6.04 回/h
(外気のみ)		外気風量	8,870 m ³ /h	理論換気回数	3.57 回/h
フィルター	プレフィルター+中性能フィルター				

(b) 換気状況調査結果

新国立劇場小劇場調査における各測定地点のトレーサー濃度の変化を Fig. 3 に示す。CO₂ と粒子では減少速度に明らかな違いが見られた。CO₂ の計測結果より換気回数を計算したところ、1.7 回/時間となった。これは空調の外気供給量から推測される換気回数よりも小さかった。一方、粒子の計測結果より換気回数を計算したところ、OPC による 0.3~0.5 μm の粒子の計測結果からは 11.7~13.5 回/時間となり (Fig. 4、紙面の都合上 Fig. 3 よりも前に掲示)、PM2.5 計の結果からは 12.7~18.5 回/時間となった。PM2.5 計と OPC による結果と同様になった。これらの結果はいずれも CO₂ による換気回数の実測値や、空調設備能力から推測される換気回数よりも大きいことから、空調配管系に設置されているフィルターが有効に機能していることが示された。

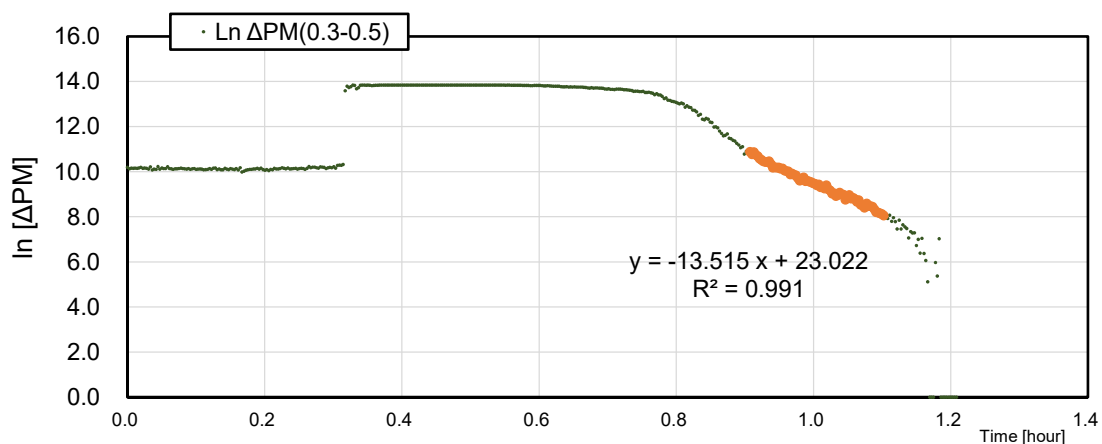


Fig. 4 新国立劇場Aリハーサル室調査における測定地点の粒子濃度の変化 (2020/8/11 実施)

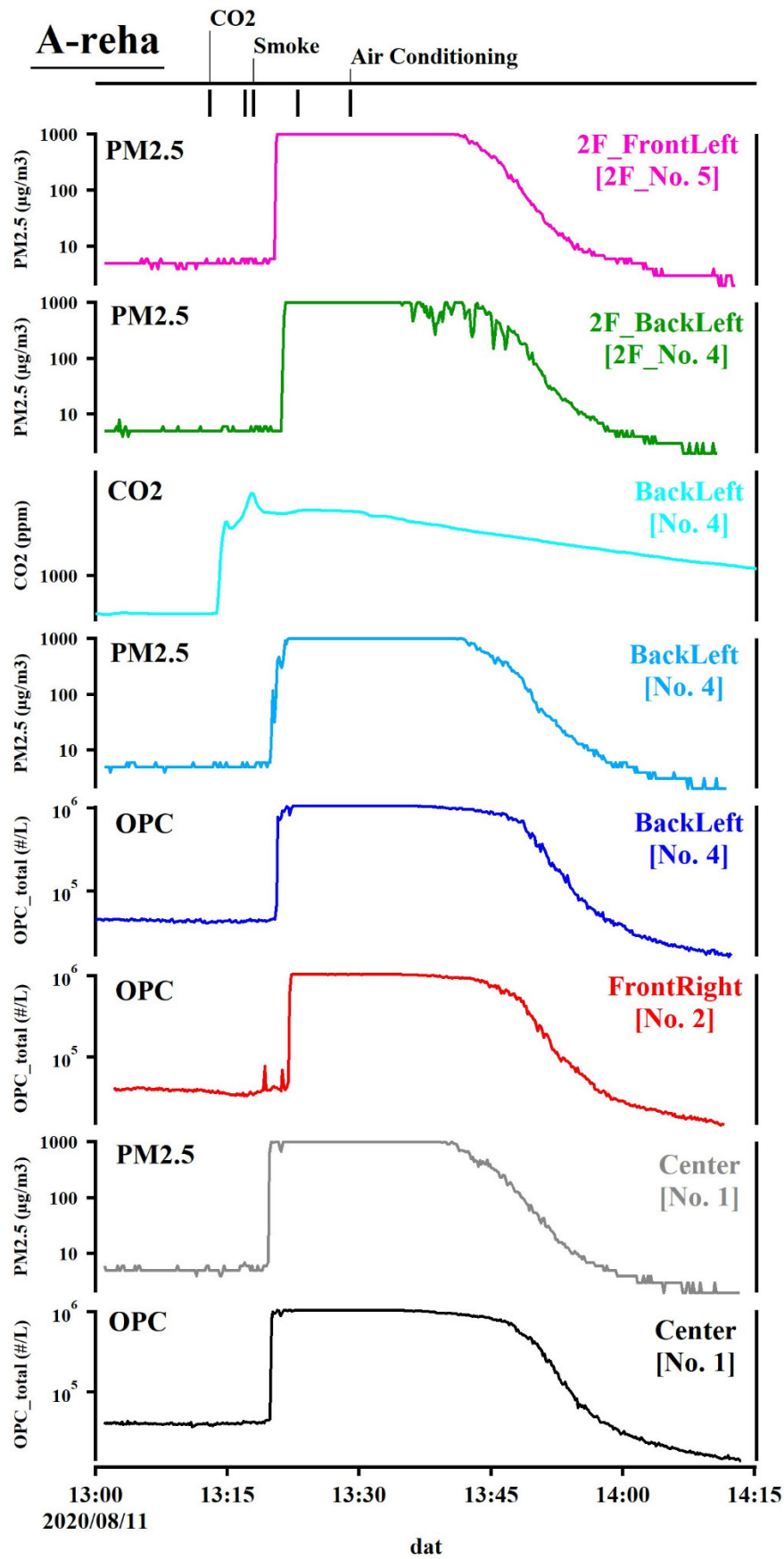


Fig. 3 新国立劇場Aリハーサル室調査における各測定地点のトレーサー濃度の変化(2020/8/11 実施)

6. Cリハーサル室の調査結果概要

(a) 換気設備

舞台客席系統	容積 2,280 m ³	空調風量 14,304 m ³ /h	理論換気回数 6.27 回/h
(外気のみ)		外気風量 7,800 m ³ /h	理論換気回数 3.42 回/h
フィルター	プレフィルター+中性能フィルター		

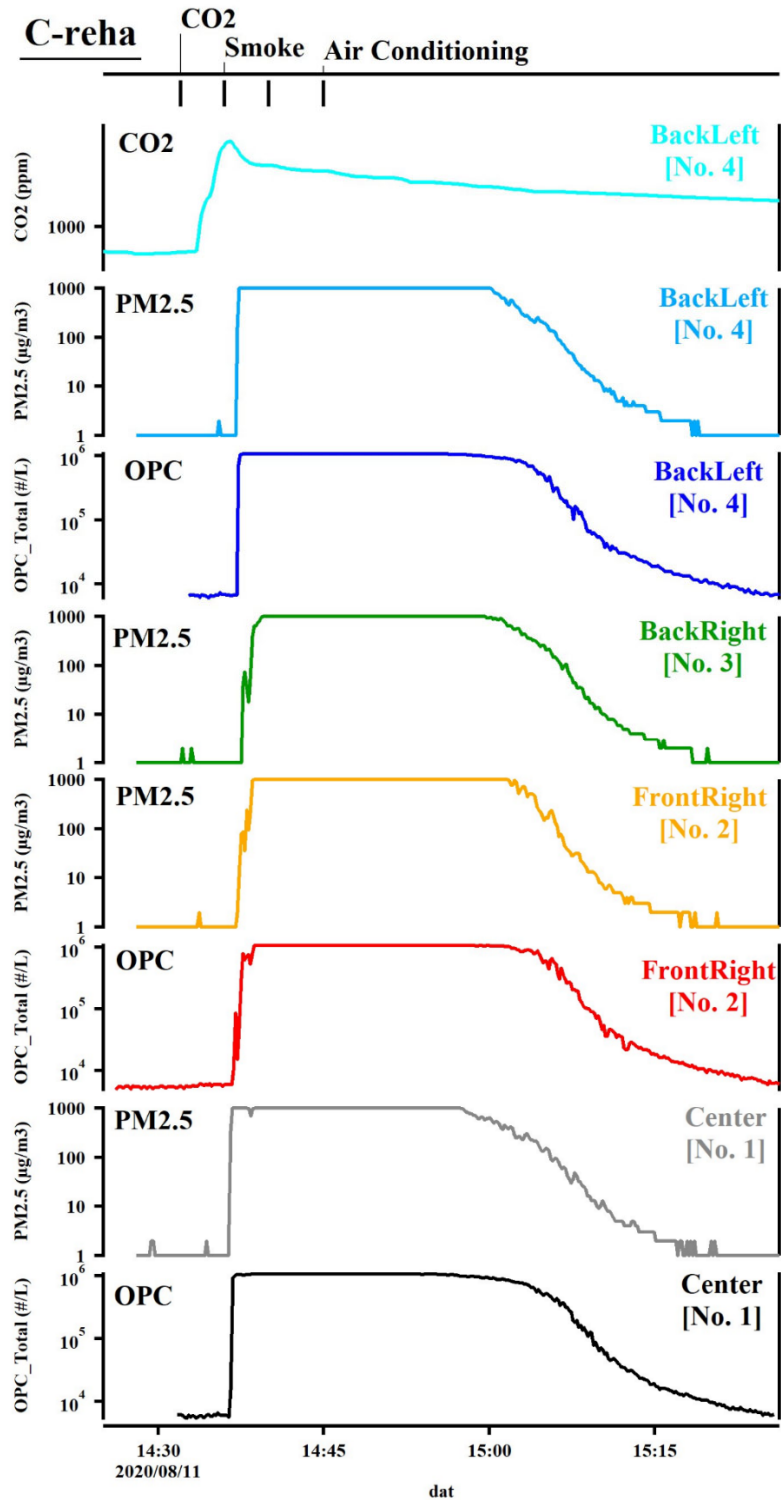


Fig. 5 新国立劇場Cリハーサル室調査における各測定地点のトレーサー濃度の変化(2020/8/11 実施)

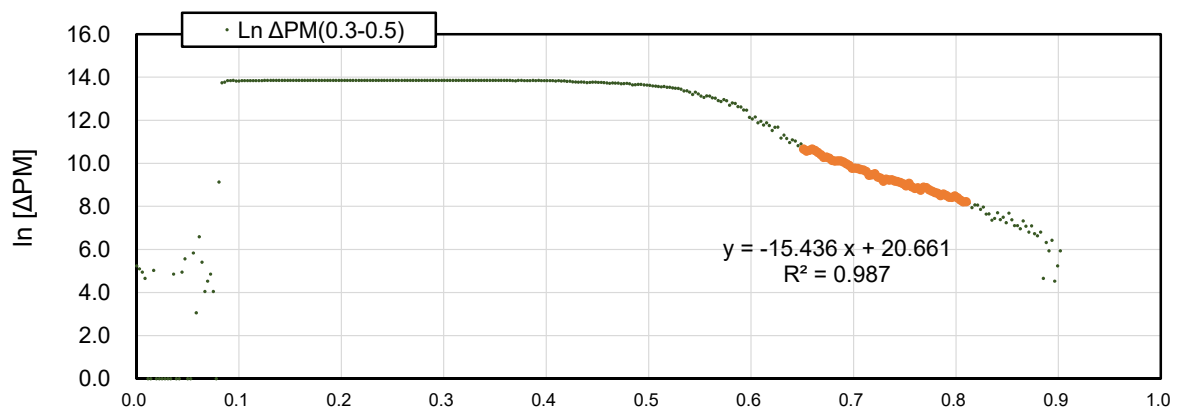


Fig. 6 新国立劇場Cリハーサル室調査における測定地点の粒子濃度の変化 (2020/8/11 実施)

(b) 換気状況調査結果

新国立劇場小劇場調査における各測定地点のトレーサー濃度の変化を Fig. 5 に示す。CO₂ と粒子では減少速度に明らかな違いが見られた。CO₂ の計測結果より換気回数を計算したところ、1.3 回/時間となった。これは空調の外気供給量から推測される換気回数よりも小さかった。一方、粒子の計測結果より換気回数を計算したところ、OPC による 0.3～0.5 μm の粒子の計測結果からは 12.4～15.4 回/時間となり (Fig. 6)、PM2.5 計の結果からは 14.1～37.3 回/時間となった。PM2.5 計と OPC による結果と同様になった。これらの結果はいずれも CO₂ による換気回数の実測値や、空調設備能力から推測される換気回数よりも大きいことから、空調配管系に設置されているフィルターが有効に機能していることが示された。

7. 合唱リハーサル室の調査結果概要

(a) 換気設備

舞台客席系統	容積 959 m ³	空調風量	4,280 m ³ /h	理論換気回数	4.46 回/h
(外気のみ)		外気風量	2,300 m ³ /h	理論換気回数	2.40 回/h
フィルター	プレフィルター＋中性能フィルター				

(b) 換気状況調査結果

新国立劇場小劇場調査における各測定地点のトレーサー濃度の変化を Fig. 7 に示す。CO₂ と粒子では減少速度に明らかな違いが見られた。CO₂ の計測結果より換気回数を計算したところ、1.6 回/時間となった。これは空調の外気供給量から推測される換気回数よりもやや小さかった。一方、粒子の計測結果より換気回数を計算したところ、OPC による 0.3～0.5 μm の粒子の計測結果からは 7.5～7.7 回/時間となり (Fig. 8)、PM2.5 計の結果からは 11.1～12.4 回/時間となった。PM2.5 計は OPC と比較するとより大きい粒子径側の個数濃度を反映していると考えられる。これらの結果はいずれも CO₂ による換気回数の実測値や、空調設備能力から推測される換気回数よりも大きいことから、空調配管系に設置されているフィルターが有効に機能していることが示された。

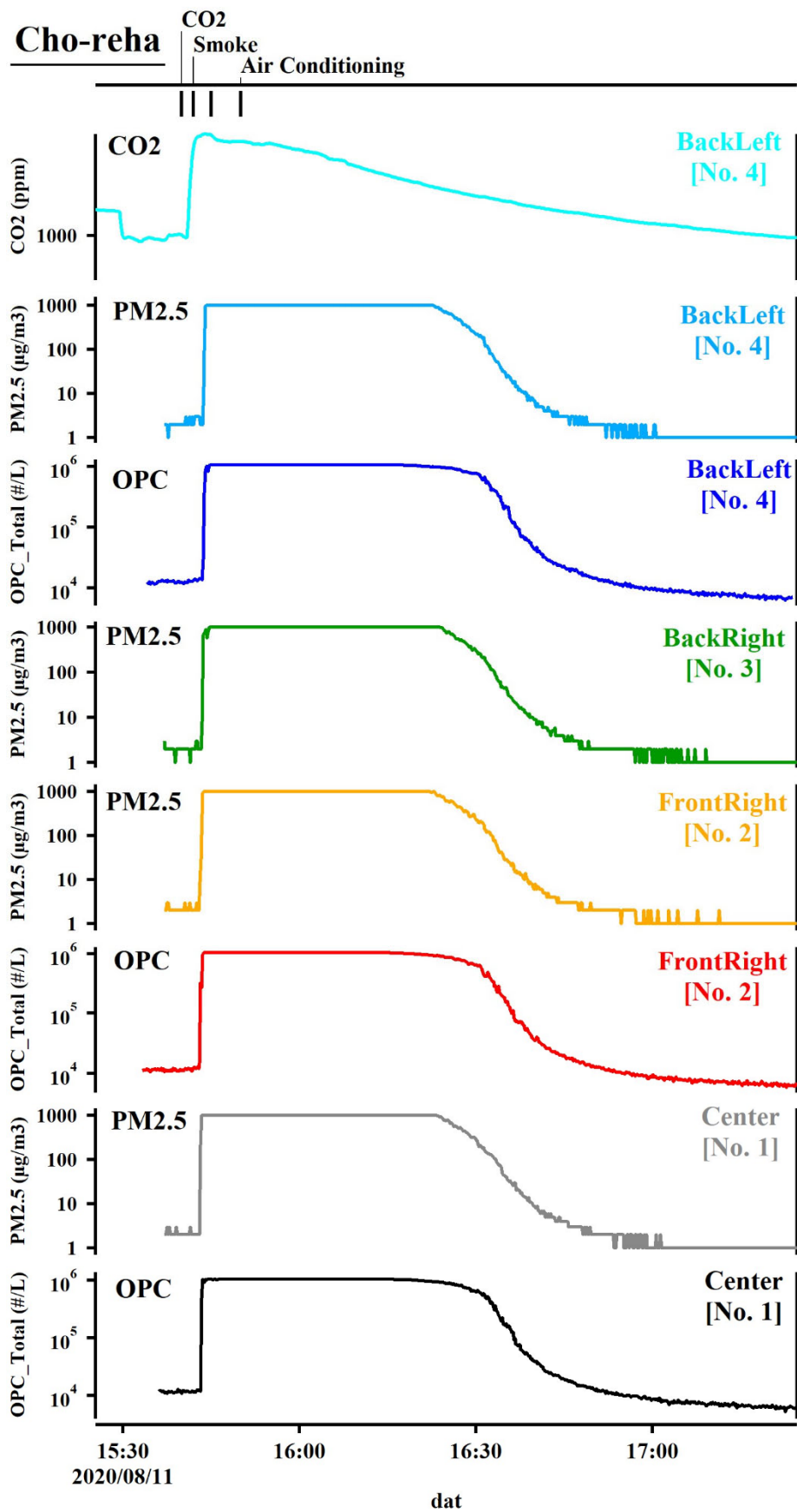


Fig. 7 新国立劇場合唱リハーサル室調査における各測定地点のトレーサー濃度の変化(2020/8/11 実施)

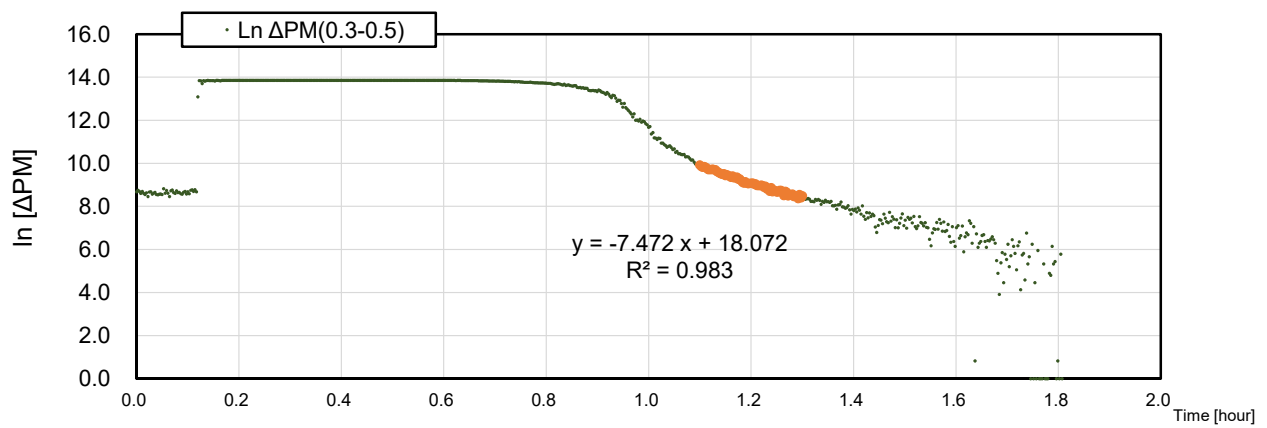
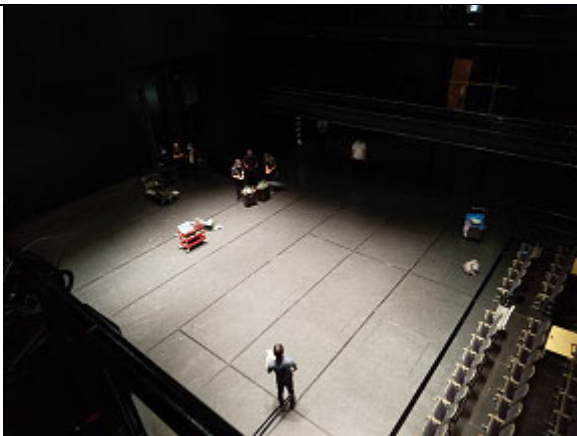


Fig. 8 新国立劇場合唱リハーサル室調査における測定地点の粒子濃度の変化(2020/8/11 実施)

8. 参考写真



▲ [小劇場] CO2 を放出



▲ [小劇場] スモークを放出



▲ [Aリハ] スモークを放出



▲ [合唱リハ] スモークを放出

IV. その他の実測データ評価

1. 調査結果要約

新国立劇場では、新型コロナウイルス感染症の流行以前から、劇場内の環境快適性の向上と現状把握を主目的として CO₂ 濃度の計測を実施してきた。本項では、これらの実測値と今回実施してきた一連の換気状況調査結果を照合し、新国立劇場内の実質的な換気状態について考察した。その結果、今回対象とした利用者数の範囲においては、オペラパレス・中劇場・小劇場・A リハーサル室において、換気状態は良好であった。バレエリハーサル室も換気状態は良好ではあったが、利用者の活動量が大きいため、利用者の活動量が多いことが予想されるため、休憩時には室外に出るなどの対策を行うことが望ましい。また換気対策のみに目を向けるのではなく、接触感染や飛沫感染の防止に努めることが総合的なリスク低減のために必要である。

2. 測定装置及び測定場所

オペラパレス・中劇場・小劇場・・・新国立劇場地下2階空調機械室空調機内で測定

計測装置：アズビル(株)製ビル管理システム CO₂ センサー (CY8100C1001)

各リハーサル室・・・各室内の約2mの高さで測定

計測装置：(株)佐藤商事製 CO₂ 濃度計 (HJ-CO2SD)

CO₂ 濃度シミュレーション：日本産業衛生学会(2020)「換気シミュレーター ver 1.0」を基に奥田が実施

3. 大劇場オペラパレス

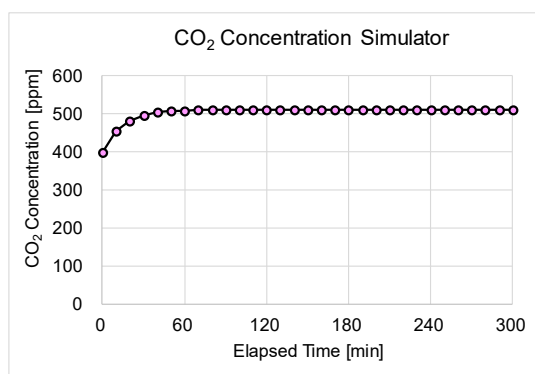
新国立劇場の調査によれば、2019/11/28～12/22 までの合計 10 回の公演における平均人数（販売席数、出演者及びスタッフを含めた「空間内に居た全ての人数」）は、平均値±標準偏差で表現すると 1,800±206 人であり、CO₂ 濃度の最大値と最小値の差は 69±8 ppm であった。全ての公演において、CO₂ 濃度は 500 ppm 未満であった。また、実際の空間容積、空間内人数を入力し、CO₂ 濃度を約 500 ppm としたシミュレーションからは、劇場内の換気速度は約 4.0 回/h となった (Fig. 1)。ここから推定される 1 人あたりの換気量は約 160 m³/h であり、これは建築基準法 (20 m³/h) や空気調和・衛生工学会規格 (30 m³/h) の提唱する数値を大きく上回る結果となった。総じて、新国立劇場大劇場オペラパレスの換気状態は極めて良好であったと言える。

※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	511 ppm	室内CO ₂ 濃度
Ce	46,000 ppm	呼気中CO ₂ 濃度
Co	400 ppm	外気中CO ₂ 濃度
G	32.29200 m ³ /h	CO ₂ 発生量(在室者合計)
k	1.0	平均活動量係数
m	4.00 回/h	換気回数
n	1,800 人	全在室者数
Q	289952.0 m ³ /h	換気量
R	0.39 m ³ /h	1人当たりの呼気量
t	h	経過時間
V	72,488 m ³	部屋の容積
Q/n	161.1 m ³ /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)



新国立劇場オペラ劇場に 1,800人

Fig. 1 新国立劇場オペラパレスの諸条件を用いた CO₂ 濃度シミュレーション

4. 中劇場

新国立劇場の調査によれば、2019/11/2～12/1 までの合計 7 回の公演における平均人数は 950 ± 210 人であり、CO₂濃度の最大値と最小値の差は 173 ± 49 ppm であった。全ての公演において、CO₂濃度は 700 ppm 未満であった。また、実際の空間容積、空間内人数を入力し、CO₂濃度を約 700 ppm としたシミュレーションからは、劇場内の換気速度は約 1.0 回/h となった (Fig. 2)。ここから推定される 1 人あたりの換気量は約 60 m³/h であり、これは建築基準法 (20 m³/h) や空気調和・衛生工学会規格 (30 m³/h) の提唱する数値を大きく上回る結果となった。総じて、新国立劇場中劇場の換気状態は良好であったと言える。

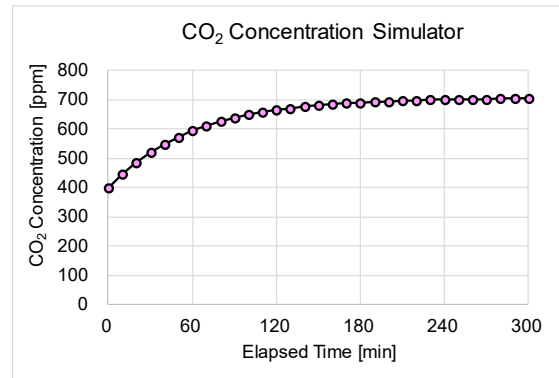
※数値や考え方の原典は、日本産業衛生学会(2020)「換気シミュレーター ver 1.0」

C	706 ppm	室内CO ₂ 濃度
Ce	46,000 ppm	呼気中CO ₂ 濃度
Co	400 ppm	外気中CO ₂ 濃度
G	17.04300 m ³ /h	CO ₂ 発生量(在室者合計)
k	1.0	平均活動量係数
n	1.00 回/h	換気回数
m	950 人	全在室者数
Q	55719.0 m ³ /h	換気量
R	0.39 m ³ /h	1人当たりの呼気量
t	h	経過時間
V	55,719 m ³	部屋の容積
Q/n	58.7 m ³ /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)



新国立劇場 中劇場に 950人

Fig. 2 新国立劇場中劇場の諸条件を用いた CO₂ 濃度シミュレーション

5. 小劇場

新国立劇場の調査によれば、2019/10/3～10/20 までの合計 14 回の公演における平均人数は 312 ± 26 人であり、CO₂濃度の最大値と最小値の差は 381 ± 33 ppm であった。全ての公演において、CO₂濃度は 900 ppm 未満であった。また、実際の空間容積、空間内人数を入力し、CO₂濃度を約 870 ppm としたシミュレーションからは、劇場内の換気速度は約 2.0 回/h となった (Fig. 3)。ここから推定される 1 人あたりの換気量は約 38 m³/h であり、これは建築基準法 (20 m³/h) や空気調和・衛生工学会規格 (30 m³/h) の提唱する数値を上回る結果となった。総じて、新国立劇場小劇場の換気状態は良好であったと言える。

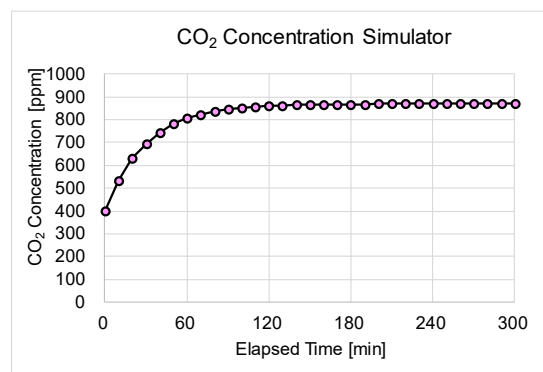
※数値や考え方の原典は、日本産業衛生学会(2020)「換気シミュレーター ver 1.0」

C	869 ppm	室内CO ₂ 濃度
Ce	46,000 ppm	呼気中CO ₂ 濃度
Co	400 ppm	外気中CO ₂ 濃度
G	5.59728 m ³ /h	CO ₂ 発生量(在室者合計)
k	1.0	平均活動量係数
m	2.00 回/h	換気回数
n	312 人	全在室者数
Q	11924.0 m ³ /h	換気量
R	0.39 m ³ /h	1人当たりの呼気量
t	h	経過時間
V	5,962 m ³	部屋の容積
Q/n	38.2 m ³ /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)



新国立劇場 小劇場に 312人

Fig. 3 新国立劇場小劇場の諸条件を用いた CO₂ 濃度シミュレーション

6. Aリハーサル室

新国立劇場の調査によれば、2020/8/25～8/28 の期間における A リハ室内の CO₂ 濃度は最大で約 700 ppm であり、その間の最大同時利用者数は 55 名であった。また、実際の空間容積、空間内人数を入力し、CO₂ 濃度を約 700 ppm としたシミュレーションからは、A リハ内の換気速度は約 2.0 回/h となった (Fig. 4)。これは p.18 に示した換気回数の実測値 (1.7 回/h) とほぼ同等であった。ここから推定される 1 人あたりの換気量は約 90 m³/h であり、これは建築基準法 (20 m³/h) や空気調和・衛生工学会規格 (30 m³/h) の提唱する数値を上回る結果となった。従って、この人数で使用する範囲では、新国立劇場 A リハ室の換気状態は良好であると言える。

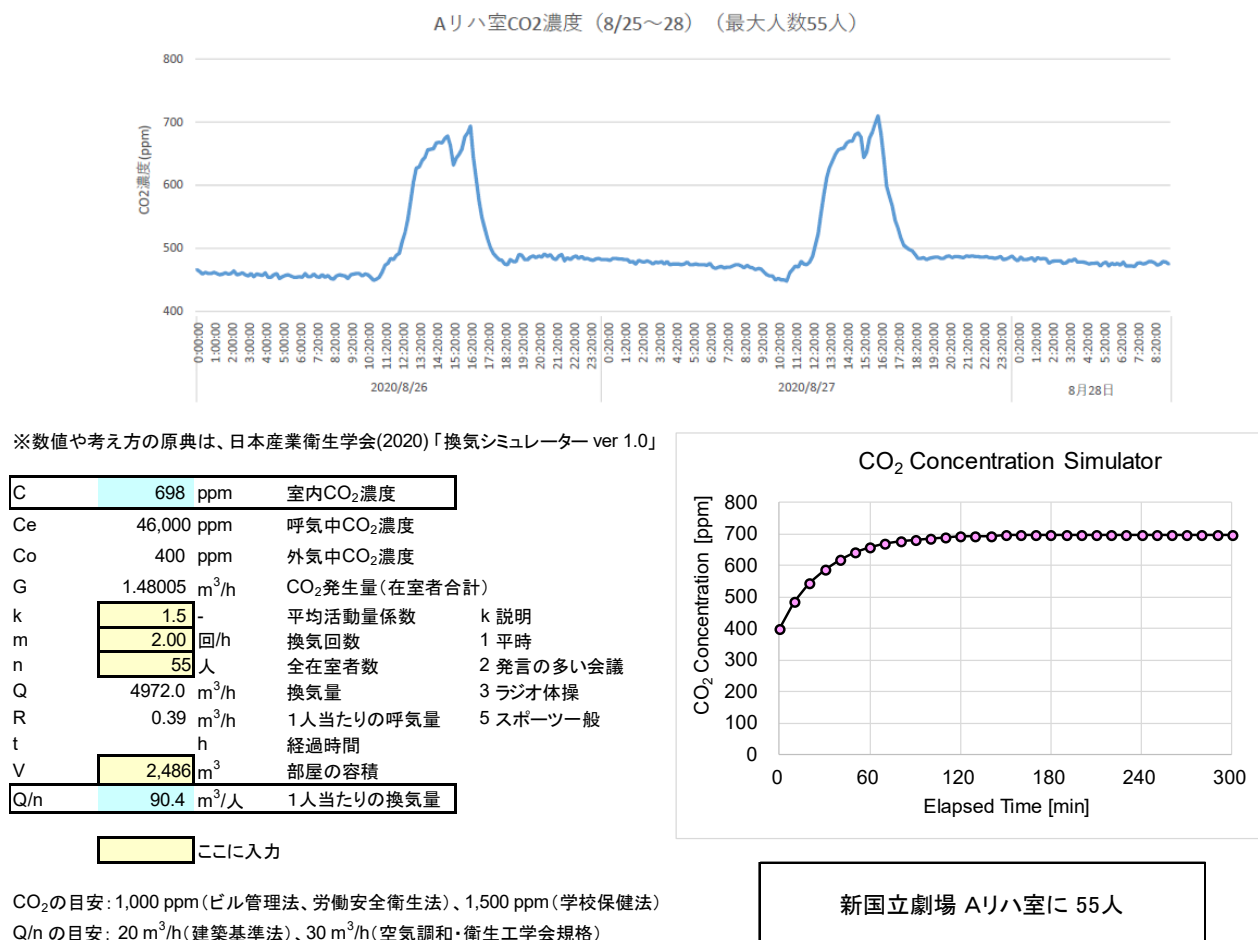


Fig. 4 新国立劇場 A リハ室における CO₂ 濃度の実測値(上)と、諸条件を用いたシミュレーション(下)

7. バレエリハーサル室

新国立劇場の調査によれば、2020/11/10 におけるバレエリハ室内の CO₂ 濃度は最大で約 950 ppm であり、その間の最大同時利用者数は 75 名であった。また、実際の空間容積、空間内人数を入力し、CO₂ 濃度を約 980 ppm としたシミュレーションからは、バレエリハ室内の換気速度は約 3.5 回/h となった (Fig. 5)。なおバレエのリハーサル室のため、利用者の平均活動量係数を $k=3.5$ (全員が利用時間中平時の 3.5 倍程度の呼吸量) と想定した。ここから推定される 1 人あたりの換気量は約 108 m³/h であり、これは建築基準法 (20 m³/h) や空気調和・衛生工学会規格 (30 m³/h) の提唱する数値を上回る結果となった。従って、この人数で使用する範囲においては、新国立劇場バレエリハ室の換気状態は良好であると言える。

ただし、1人あたりの換気量は大きいものの、活動量も大きいことが予想されるため、場合によっては例えば休憩は室外でとる等の対策を合わせて実施することが望ましいと考えられる。

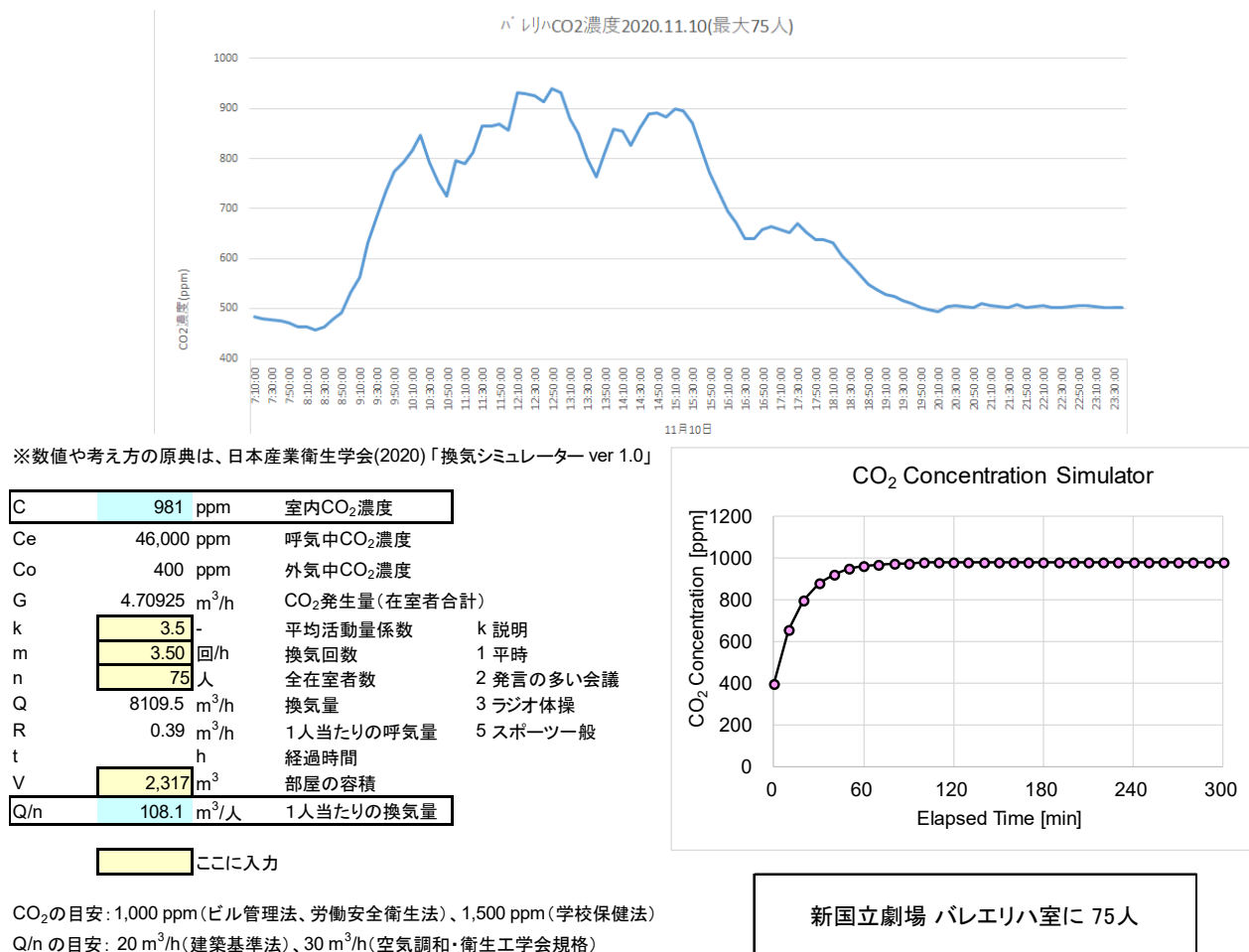


Fig. 5 新国立劇場バレエリハ室における CO₂ 濃度の実測値(上)と、諸条件を用いたシミュレーション(下)

■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。本稿は 2021/1/12 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とそれに基づく個人の見解を示したが、データ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参考になれば幸いである。

■謝辞

今回の計測では、東京工業大学 環境・社会理工学院 建築学系 鍵直樹准教授と、新国立劇場の皆さまをはじめ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、同大学院生の岡本拓真氏、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。本調査は慶應義塾大学理工学部応用化学科奥田研究室・新川崎 (K²) 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の一環として実施されました。ここに記し関係各位に感謝の意を表します。

以上