

ビッグエコー浜松町駅前店
個別ルーム内 換気状況調査
報告書 ver. 1

慶應義塾大学工学部応用化学科
教授 奥田 知明

2021年1月12日

※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。本稿は執筆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。また、本報告書の内容は2020年12月5日にビッグエコー浜松町駅前店の客室818, 823, 820において実施された実験結果に基づくものであり、カラオケボックス全てに当てはまるわけではない。新型コロナウイルスの感染経路として主要なものは接触感染および飛沫感染と考えられており、換気対策のみではこれらのリスクを下げることはできないため、当然ではあるが接触感染および飛沫感染への対策は十分にとる必要がある。

1. 前提条件：本調査における2つの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2つの方法を用いて、カラオケ店の個別ルーム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、である。

この2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。今般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。なお本報告書の内容は、2020年12月5日に ビッグエコー浜松町駅前店の客室 818, 823, 820 において実施された実験結果に基づくものであり、カラオケボックス全てに当てはまるわけではないことに十分注意していただきたい。

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. 調査概要

2020年12月5日に、ビッグエコー浜松町駅前店において、カラオケ店の個別ルーム内における換気状況の調査を行った。具体的には、各ルーム内でドライアイス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、室内に設置した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室内の換気状態を推定した。

3. 実験条件

(a) 換気設備（換気種別：第一種換気）

客室#	室サイズ	室容積	設計風量	理論換気回数	エアコン風量 → 空気循環回数
818	大	64.1 m ³	580 m ³ /h	9.05 回/h	最大 2,160 m ³ /h → 33.7 回/h
823	中	31.1 m ³	280 m ³ /h	9.00 回/h	最大 642 m ³ /h → 20.6 回/h
820	小	13.3 m ³	120 m ³ /h	9.02 回/h	最大 558 m ³ /h → 42.0 回/h

(b) 実験装置

CO₂濃度計（T&D, TR-76Ui）

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）

4. 測定結果

ビッグエコー浜松町駅前店の客室818, 823, 820におけるトレーサー濃度の変化をFig. 1に示す。全ての客室において、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、818, 823, 820の順に5.6, 7.1, 7.9回/時間となった。これは設備風量を用いた計算値よりやや小さかったものの、一般家庭やオフィスなどと比較すると非常に速い換気速度であると言える。一方、粒子の計測結果より粒子を対象とした換気回数を計算したところ、PM2.5計の結果からは818, 823, 820の順に56.5, 20.5, 129.7回/時間となった。これはエアコン風量から推測される粒子を対象とした換気回数とほぼ同等からそれ以上の値であった。また、客室818ではOPC (Optical Particle Counter: 光散乱式粒子計数器)でも同様に測定を行ったが、光散乱等価径範囲0.3-0.5, 0.5-1.0, 1.0-2.0, 2.0-5.0 μmの順に27.3, 58.4, 66.9, 32.3回/時間となり、PM2.5計による結果に近い値となった。これらの結果はいずれもCO₂による換気回数の実測値よりも大きいことから、空調配管系およびエアコン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。

上述の調査結果をまとめると、今回調査を行ったカラオケボックスの3つの客室においては、換気速度すなわち外気の取り入れ速度は非常に速く、さらに粒子を対象とした換気回数すなわち粒子の減少速度は外気の取り入れ速度よりも顕著に速かった。粒子を対象とした換気回数が20回/時間である時、その空間に粒子が浮遊している時間は平均で3分間である。すなわち、高濃度のウイルスを含む粒子が空間に滞留することによって発生すると考えられているいわゆるエアロゾル感染（飛沫核感染）が起こるリスクは、少なくともこれよりも換気速度が遅い一般家庭や一般的なオフィス等と比較して低いであろうことが考えられる。なお、新型コロナウイルスの感染経路として主要なものは接触感染および飛沫感染と考えられており、換気対策のみで

はこれらのリスクを下げることはできないが、それはカラオケボックスに限らず全ての場面において当てはまることであることを付記する。

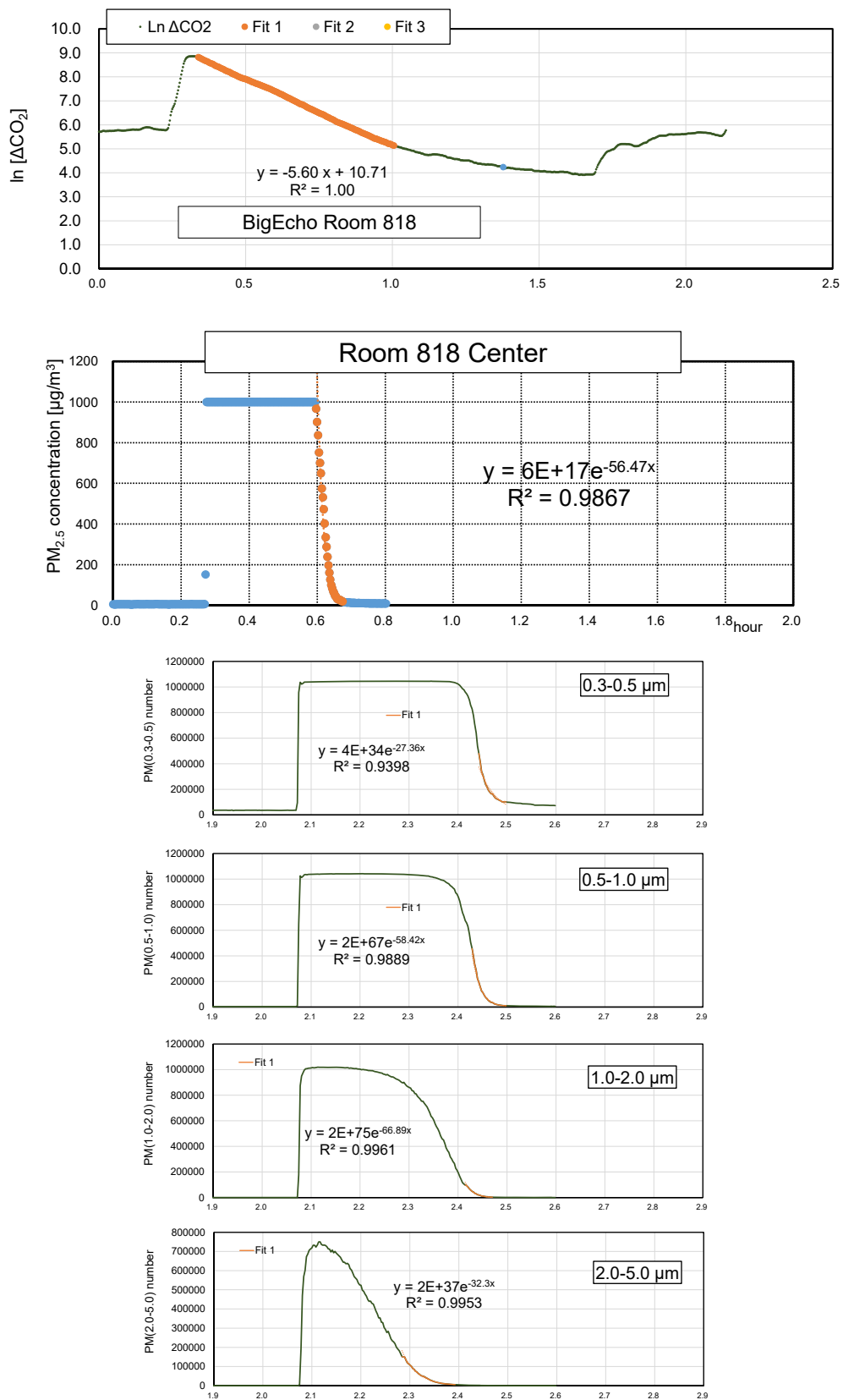


Fig. 1 ビッグエコー浜松町駅前店における各客室のトレーサー濃度減衰実験結果

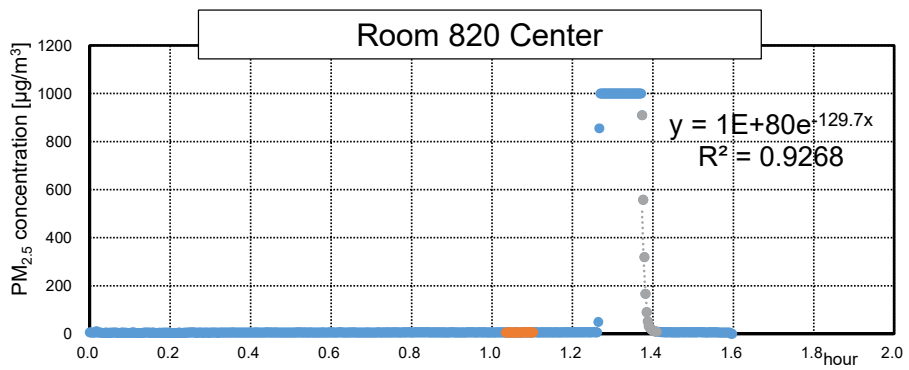
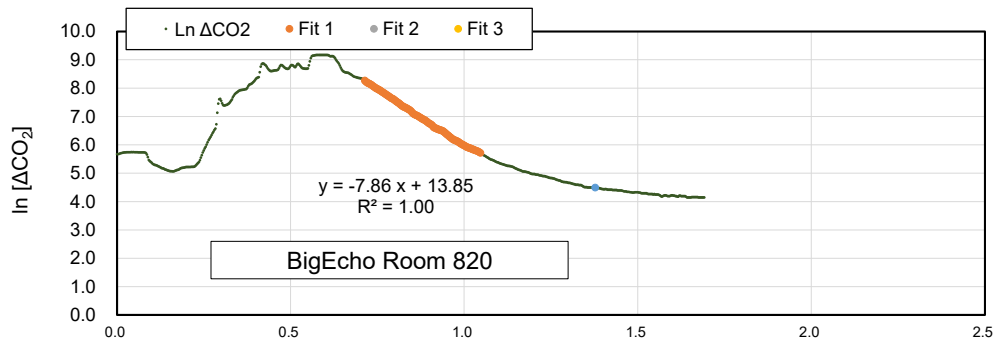
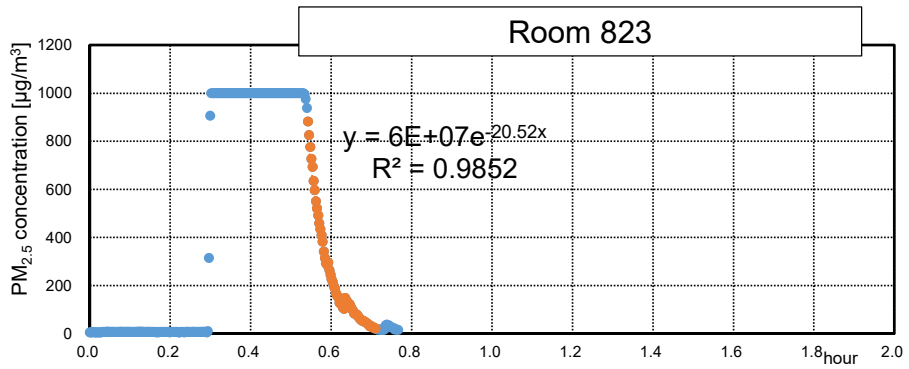
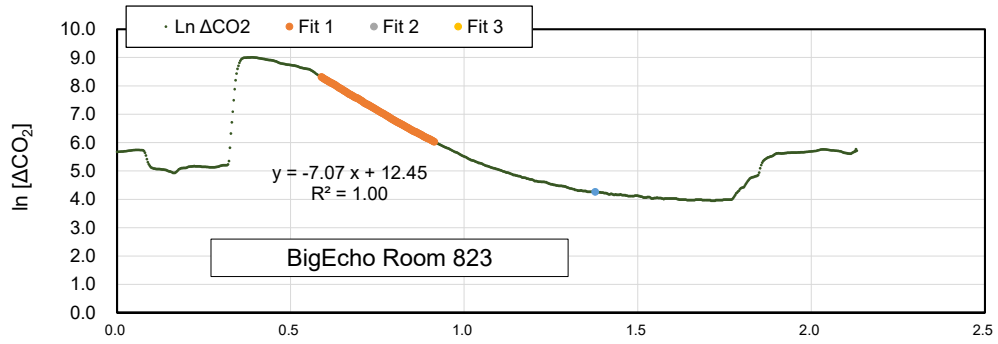


Fig. 1 ビッグエコー浜松町駅前店における各客室のトレーサー濃度減衰実験結果(続き)

5. 調査時の写真

以下にビッグエコー浜松町駅前店における換気調査の様子を写真にて示す。



▲ビッグエコー浜松町駅前店 外観



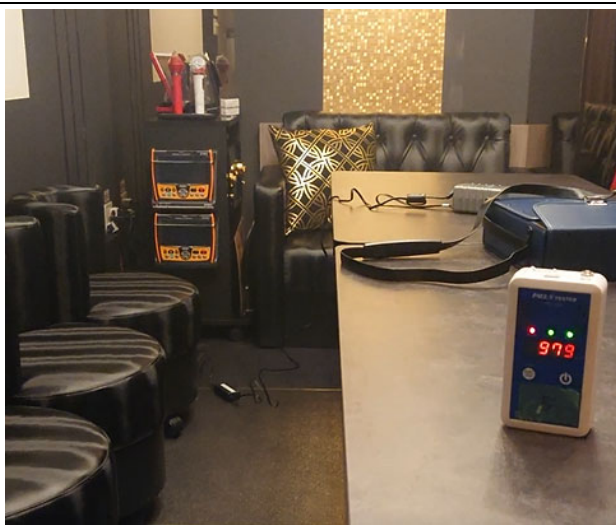
▲測定機材設置の様子(客室 818)



▲ドライアイスによる CO₂ 散布の様子(客室 818)



▲スモークを焚いた直後の様子(客室 818)



▲測定中の様子(客室 823)



▲測定中の様子(客室 820)

6. カラオケボックスの個別ルームへの入室人数による換気状態のシミュレーション

在室者から一定速度で発生するCO₂が一定量の換気空気と完全混合されるモデルを仮定した室内CO₂濃度のシミュレーションを実施した。このシミュレーションの意義であるが、ウイルスが感染者の人間の呼気と共に空間中に放出され、それが蓄積することで空間中のウイルス濃度が上がり、他人へのいわゆるエアロゾル感染（飛沫核感染）が起こると考える時、検出の難しいウイルスそのものの代わりに、人間の呼気に約5%含まれる二酸化炭素CO₂濃度を調べることで、エアロゾル感染のリスクを考えよう、というものである。つまり、CO₂濃度が上がればウイルス濃度も上がる、と考えることになる。なおCO₂濃度シミュレーションおよび計算に必要なパラメータは、日本産業衛生学会(2020)「換気シミュレーターver 1.0」を基にして、計算には奥田が作成した簡易シミュレーターを用いた。外気のCO₂濃度は400ppmとし、また、入室者全員の平均的な活動レベルは、発言の多い会議に相当するk=2とした。

ビッグエコー浜松町駅前店の客室818, 823, 820について実際の条件を入力した。換気回数は実測値とし、CO₂濃度1,500ppm（学校保健法）および1人当たりの換気量30m³（空気調和・衛生工学会規格）を同時に満たすための各室への入室人数の上限値を推算した。その結果、客室818では11人、823では6人、820では3人となった。なお、この結果は、実際には粒子の減少速度がCO₂よりも極めて速かったことは考慮していないものである。すなわち、ウイルスそのものも粒子の一種であり、またウイルスは粒子に付着した状態で空間中に浮遊していることを考慮すると、粒子の減少速度が極めて速いということは、エアロゾル感染（飛沫核感染）のリスクが低いということを意味する。つまり上述した各室における上限人数は、かなり安全側に余裕をみた人数であることを示している。

換気回数は、室の大きさと換気設備能力などといったその場の物理的・機械的な条件のみで決まる値であるが、換気状態を議論するためには、「その空間に何人いるか」ということを考えることが極めて重要である。換気回数が基準を満たしていたとしても、その空間にいる人数が多くなってくるとリスクは高まる。ここで参考までに、89名のうち10名が実際に新型コロナウイルスに感染した中国広州のレストランにおける条件(Li et al., 2020)より、当該レストラン空間のCO₂濃度のシミュレーション結果を、各パラメータの定義および出典と共にFig.3に示す。その結果、空間内のCO₂濃度は9,000ppmを超え、1人当たりの換気量は4m³/hを下回っていたと推定された。ただし、この条件では飛沫核感染が疑われてはいるが、それ以前の前提として、接触感染や飛沫感染が発生していた可能性は十分にある。この条件なら必ず飛沫核感染が起こると言うことも、これ以下なら安全と言うこともできないが、1つの目安として、このように極端に換気状態が悪い空間を作らないようにする努力は必要であると考えられる。

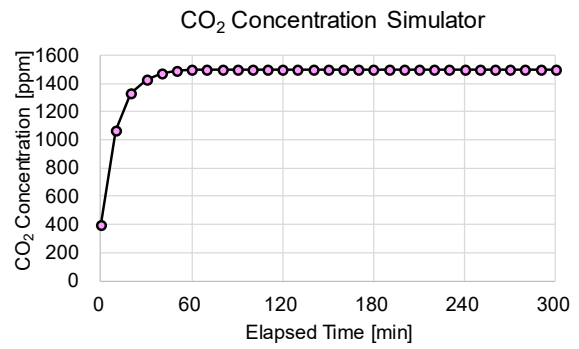
さらに別の例であるが、一般的な家庭の換気回数はそれほど高くなく、建築基準法では0.5回/時間が求められている。ここで、「自宅の締め切った6畳間において6人が飲食をしている」状況を考えてみる。これは一般的に起こり得るシチュエーションであると思われる。なお換気回数は、建築基準法を十分に満たす1.0回/時間として計算を行った。その結果、空間内のCO₂濃度は約9,000ppm、1人当たりの換気量は約4m³/hとなり、上述のCOVID-19クラスターが発生した広州のレストランと酷似する状況となり得ることが示された。すなわち、エアロゾル感染（飛沫核感染）のリスクのみを比較した場合は、6人で飲食をするなら自宅よりもカラオケボックスで行った方がよほど安全である。ただし繰り返しになるが、新型コロナウイルスの感染経路として主要なものは接触感染および飛沫感染と考えられており、換気対策のみではこれらのリスクを下げることはできない、つまり接触感染および飛沫感染への対策を十分にとる必要があることには注意する必要がある。

※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	1500	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	0.39468	m3/h	CO2発生量(在室者合計)
k	2.0	-	平均活動量係数
m	5.60	回/h	換気回数
n	11	人	全在室者数
Q	359.0	m3/h	換気量
R	0.39	m3/h	1人当たりの呼気量
t		h	経過時間
V	64.1	m3	部屋の容積
Q/n	32.6	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)



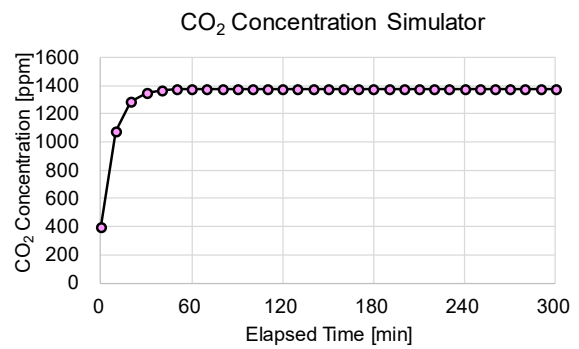
ビッグエコー浜松町駅前店
客室818 (64.1 m³) に 11人

※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	1375	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	0.21528	m3/h	CO2発生量(在室者合計)
k	2.0	-	平均活動量係数
m	7.10	回/h	換気回数
n	6	人	全在室者数
Q	220.8	m3/h	換気量
R	0.39	m3/h	1人当たりの呼気量
t		h	経過時間
V	31.1	m3	部屋の容積
Q/n	36.8	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)



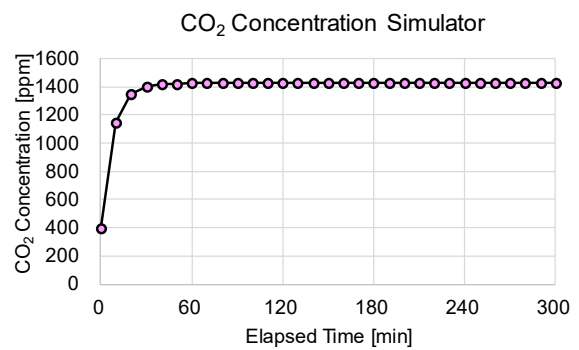
ビッグエコー浜松町駅前店
客室823 (31.1 m³) に 6人

※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	1424	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	0.10764	m3/h	CO2発生量(在室者合計)
k	2.0	-	平均活動量係数
m	7.90	回/h	換気回数
n	3	人	全在室者数
Q	105.1	m3/h	換気量
R	0.39	m3/h	1人当たりの呼気量
t		h	経過時間
V	13.3	m3	部屋の容積
Q/n	35.0	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)



ビッグエコー浜松町駅前店
客室820 (13.3 m³) に 3人

Fig. 2 ビッグエコー浜松町駅前店における各客室の換気シミュレーション結果

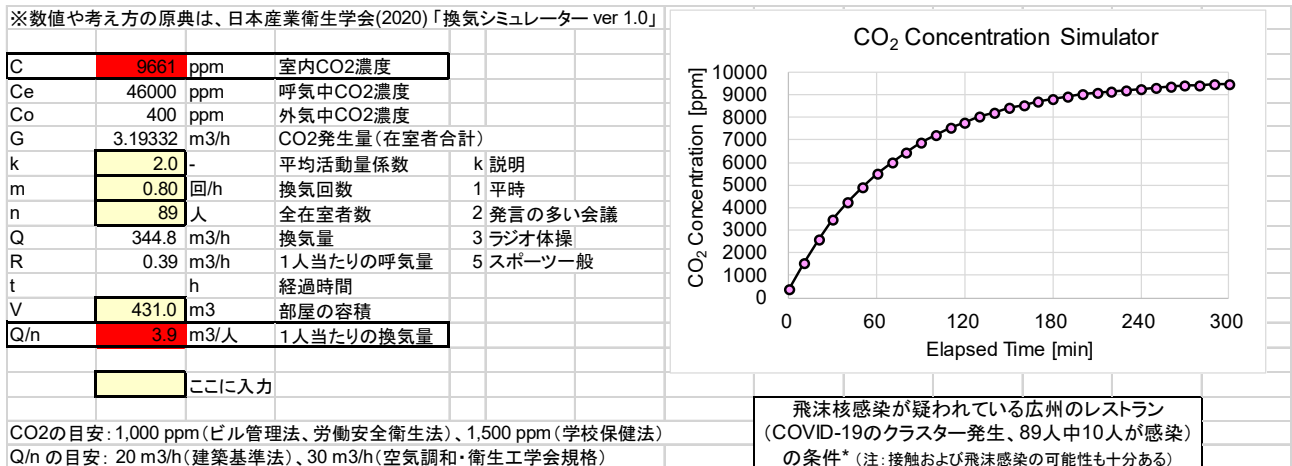


Fig. 3 飛沫核感染が疑われている広州のレストラン室内のCO₂濃度シミュレーション結果

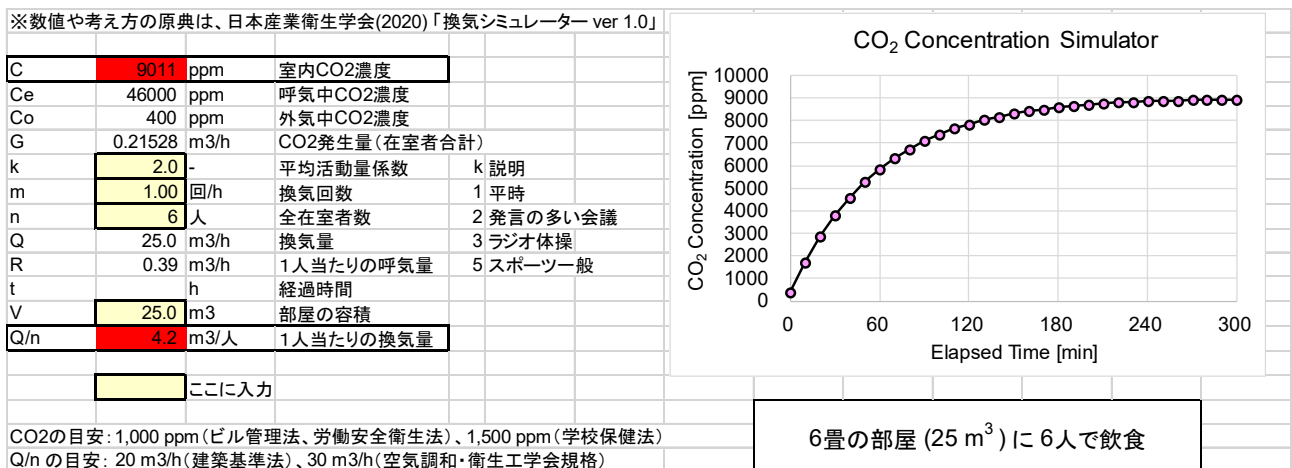


Fig. 4 一般家庭の6畳間で6人が飲食をしていると想定した場合のCO₂濃度シミュレーション結果

■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。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。また本報告書の内容は、2020年12月5日にビッグエコー浜松町駅前店の客室818, 823, 820において実施された実験結果に基づくものであり、カラオケボックス全てに当てはまるわけではないことに十分注意していただきたい。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、慶應義塾大学大学院生の尹賢禹氏に多大なご協力をいただきました。また、一般社団法人クリーンエア様、および慶應義塾大学グローバルリサーチインスティテュート・KGRI新型コロナウイルス危機研究：実践的メドテックデザインプロジェクトからは多大なご支援をいただきました。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。関係各位に厚く御礼申し上げます。

以上