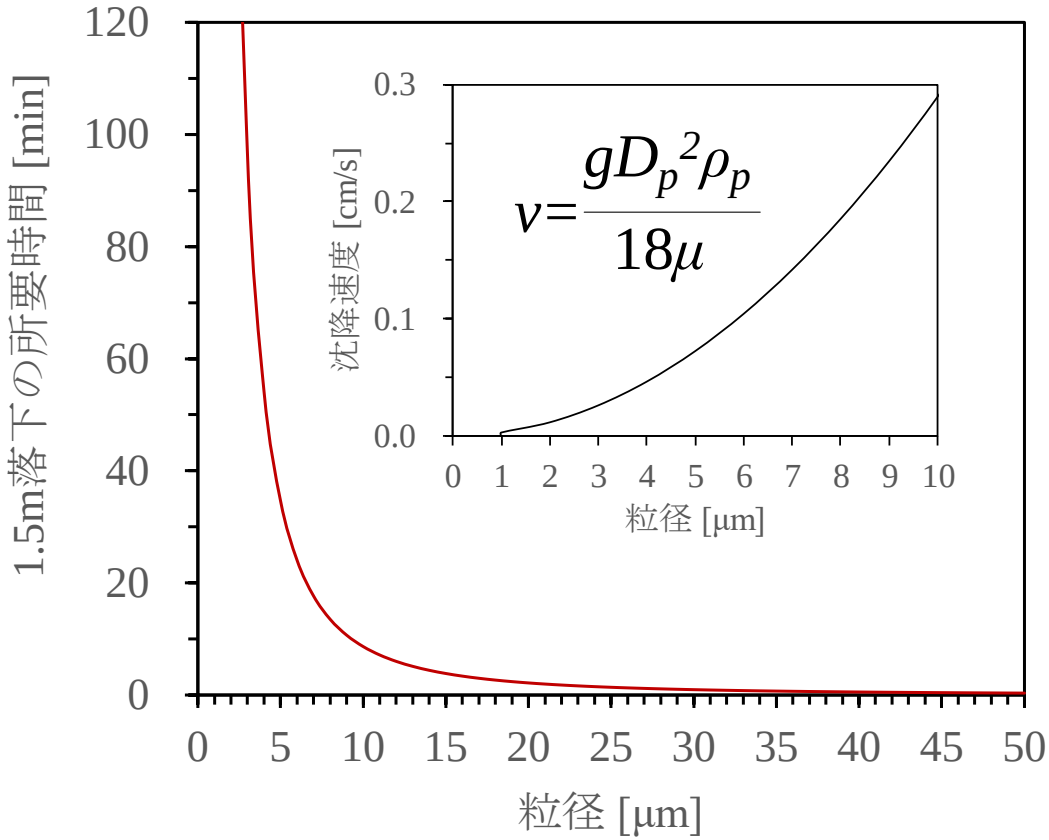
COVID-19を抑えるために
空調・換気設備ができること

柳　　宇，博士（公衆衛生学・工学）

工学院大学 建築学部 教授

1．室内環境中でのSARS-CoV-2の挙動

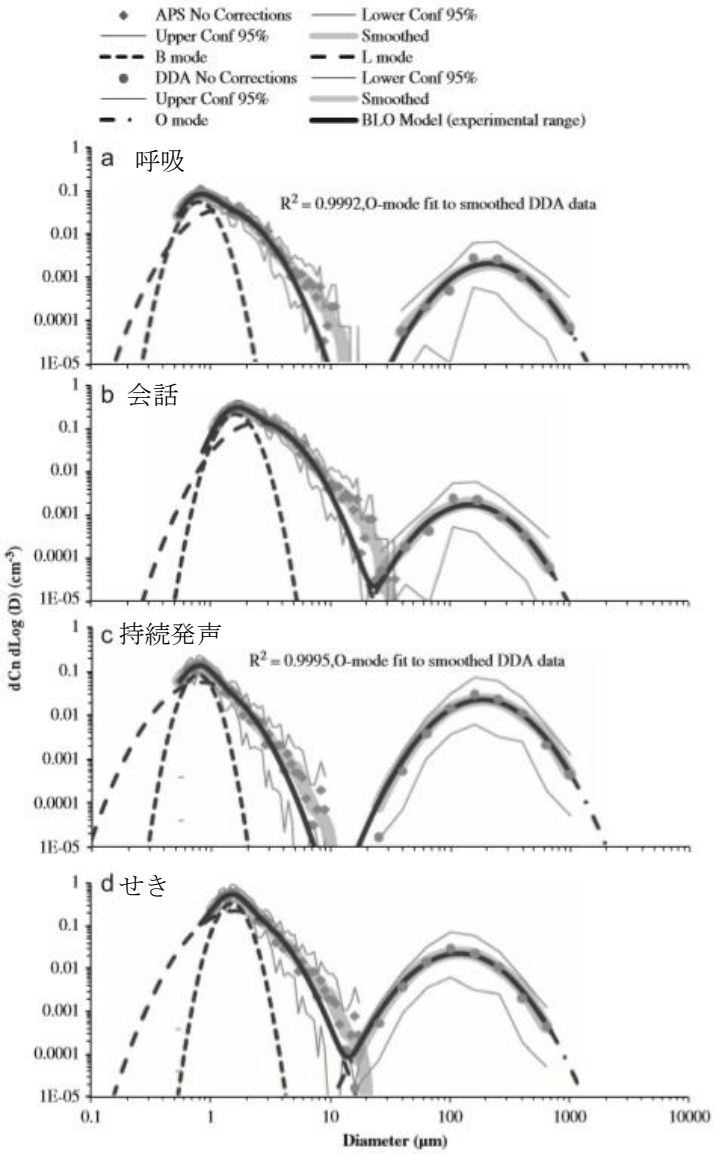


v：週末沈降速度 [cm/s]
g：重力加速度 [cm/s^2]
D_p：粒径 [cm]
ρ_p：粒子の密度 [g/cm^3]
μ：空気の粘度 [g/(cm・s)]

粒径10μm以下の粒子は無風状態で室内に長時間浮遊することが分かる
（1μm：14.4h；5μm：35min；10μm：9min）。

出典
柳宇：ウイルス感染拡大を抑えるために設備技術者が出来ること感染制とその制御、BE建築設備、第834号、2020

1．室内環境中でのSARS-CoV-2の挙動



Johnson GR, et al. Corbett S. Modality of human expired aerosol size distributions. *Journal of Aerosol Science*, 42, pp.839-851, 2011.

既往の研究では、ヒトの呼吸器系由来の活性飛沫核の粒径は殆ど<5-10μmであることが分かっている。

Chao CYH, Wan MP, Morawska L, et al. Characterization of expiration air jets and droplet size distributions immediately at the mouth opening. *J Aerosol Sci.* 2009; 40: pp.122-133.

Fang M, Lau APS, Chan CK, et al. Aerodynamic properties of biohazardous aerosols in hospitals. Hong Kong *Med J.* 2008; 14: pp.26-28.

Morawska L, Johnson GR, Ristovski ZD, et al. Size distribution and sites of origin of droplets expelled from the human respiratory tract during expiratory activities. *J Aerosol Sci.* 2009; 40: pp.256-269.

Almstrand AC, Bake B, Ljungstrom E, et al. Effect of airway opening on production of exhaled particles. *J Appl Physiol.* 2010; 108: 584-588

1．室内環境中でのSARS-CoV-2の挙動

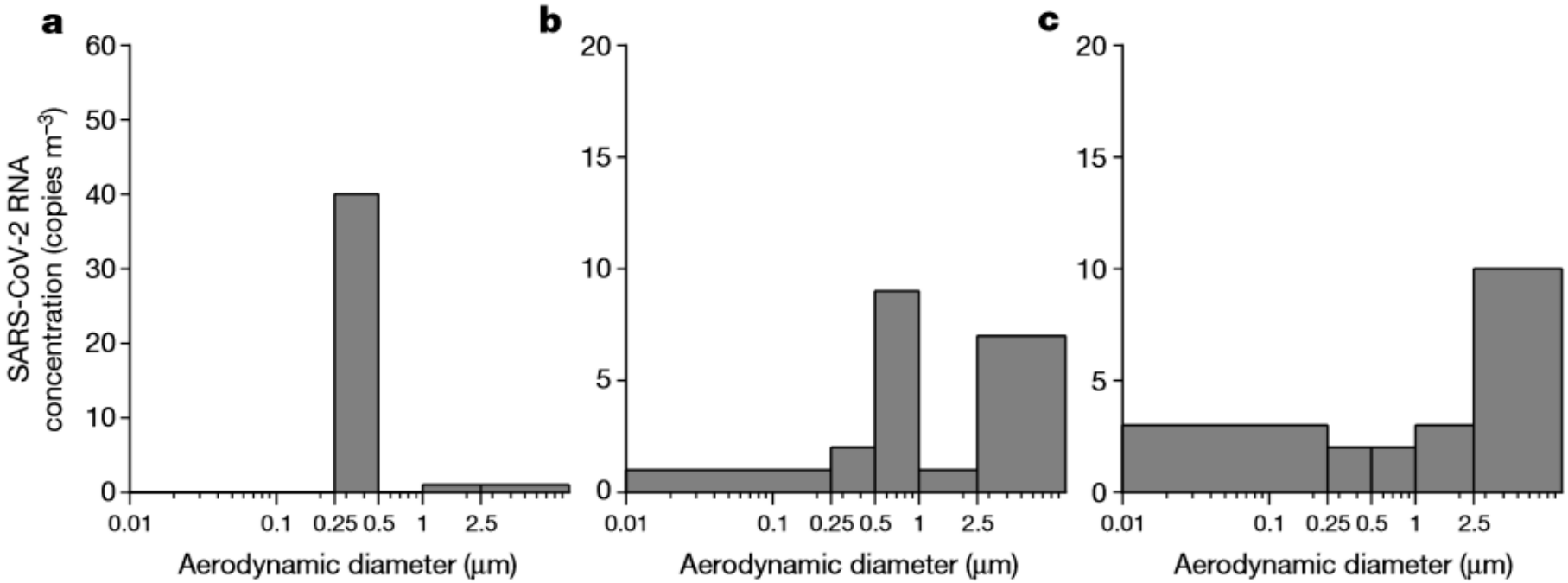


Fig. 1 | Concentration of airborne SARS-CoV-2 RNA in different aerosol size bins. a, Concentration of SARS-CoV-2 in a protective-apparel removal room in zone B of Fangcang Hospital. **b**, Concentration of SARS-CoV-2 in a protective-apparel removal room in zone C of Fangcang Hospital.

c, Concentration of SARS-CoV-2 in the medical staff's office of Fangcang Hospital. The *x* axis represents the aerodynamic diameter on a logarithmic scale to cover the multiple magnitudes of measured aerosol diameters.

出典

Liu, Y., Ning, Z., Chen, Y. et al. Aerodynamic analysis of SARS-CoV-2 in two Wuhan hospitals. Nature, 2020. medRxiv, https://doi.org/10.1038/s41586-020-2271-3

1．室内環境中でのSARS-CoV-2の挙動

感染症流行が起きたときに，疫学的にはその流行が拡大するのか，収束するのかを評価する指標として基本再生産数*Ro*（Basic reproduction number）または実効再生産数*Rt*（Effective reproduction number）が用いられている。基本再生産数*Ro*は，疫学において，感染症に感染した1人の感染者が，まだその感染症の免疫を1人も持っていない集団人口に入ったとき平均で何人に直接感染させるかという人数を表す。従って，*Ro*は感染症の原因となる病原体そのものの伝播力の強さを表すものである。

病原体	R_0	出典
MERS	<1（集団感染事例：1.0-5.7）	5）
SARS-CoV-1	飛沫・接触感染 3 咳に伴うエアロゾルの発生が場合はInfluenzaとMeaslesの間	6）
Influenza	1.8-3.0	7）
Measles	11-18	8）

※エアロゾルとは，気体中に浮遊する微小な液体または固体の粒子と周囲の気体の混合体をいう。（日本エアロゾル学会）

出典

5）WHO. MERS global summary and assessment of risk, July 2019

6）WHO. Consensus document on the epidemiology of severe acute respiratory syndrome (SARS). 2003

7）Sunmi L, Michael G, Gerardo C. optimal age-specific vaccination strategies against pandemic influenza. *Bull Math Biol* (2012) 74:958–980. 2010. DOI 10.1007/s11538-011-9704-y

8）Rubió PP. Is the basic reproductive number (R_0) for measles viruses observed in recent outbreaks lower than in the pre-vaccination era? *Euro Surveill.* 2012;17(31): pii=20233. 2012

2．空調・換気設備ができること

Table 1 Airborne Infectious Disease Engineering Control Strategies: Occupancy Interventions and Their Priority for Application and Research

Strategy	Occupancy Categories Applicable for Consideration*	Application Priority	Research Priority
Dilution ventilation	All	High	Medium
Temperature and humidity	All except 7 and 11	Medium	High
Personalized ventilation	1, 4, 6, 9, 10, 14	Medium	High
Local exhaust	1, 2, 8, 14	Medium	Medium
Central system filtration	All	High	High
Local air filtration	1, 4, 6, 7, 8 10	Medium	High
Upper-room UVGI	1, 2, 3, 5, 6, 8, 9, 14	High	Highest
Duct and air-handler UVGI	1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 14	Medium	Highest
In-room flow regimes	1, 6, 8, 9, 10, 14	High	High
Differential pressurization	1, 2, 7, 8 11, 14	High	High

Note: In practical application, a combination of the individual interventions will be more effective than any single one in isolation.

*Occupancy Categories:

1. Health care (residential and outpatient)
2. Correctional facilities
3. Educational < age 8
4. Educational > age 8
5. Food and beverage
6. Internet café/game rooms
7. Hotel, motel, dormitory
8. Residential shelters
9. Public assembly and waiting
10. Transportation conveyances
11. Residential multifamily
12. Retail
13. Sports
14. Laboratories where infectious diseases vectors are handled

出典
ASHRAE Position Document on Airborne Infectious Diseases_2020

2．空調・換気設備ができること－換気方式

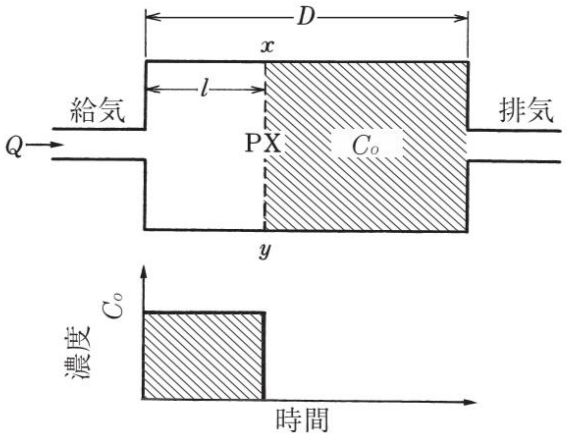


図 3･8　ピストンフロー

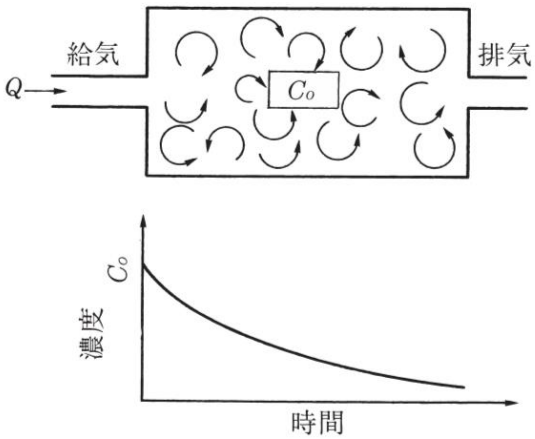


図 3･9　完全混合

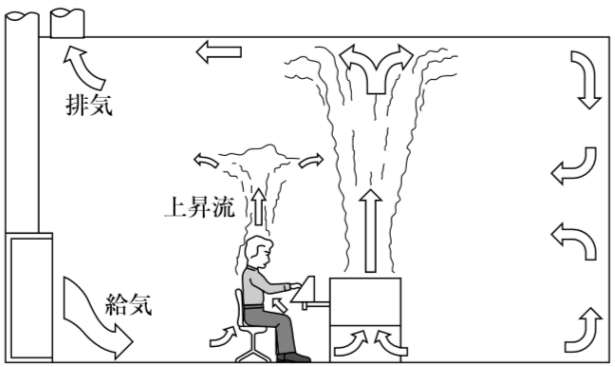


図 3･15　置換換気システム[14)]

(1)ピストンフロー

気流はピストンのように動き、混合せずに、その前にある古い空気を押し出すので、もっとも換気の効率がよい。

出典：空気調和・衛生工学会：空気調和・衛生工学便覧第14 版，3 空気調和設備設計，2010

(2)完全混合

完全混合では、濃度は時間的に上図のように減衰するするが、室内全ての点の値が等しい。

この方式はもっとも一般的な換気方式である。実際の場合、気流の滞留域が生じ、完全混合にはならないケースは殆どである。

(3)置換換気

この方式は、空気の温度差による換気力を利用した自然換気に機械換気を組み合わせたものである。即ち、上図に示すように、床レベルから室温より若干低い温度の新鮮空気を供給すると、この空気は室内の発熱体によって加熱され上昇気流となる。

2．空調・換気設備ができること－換気方式

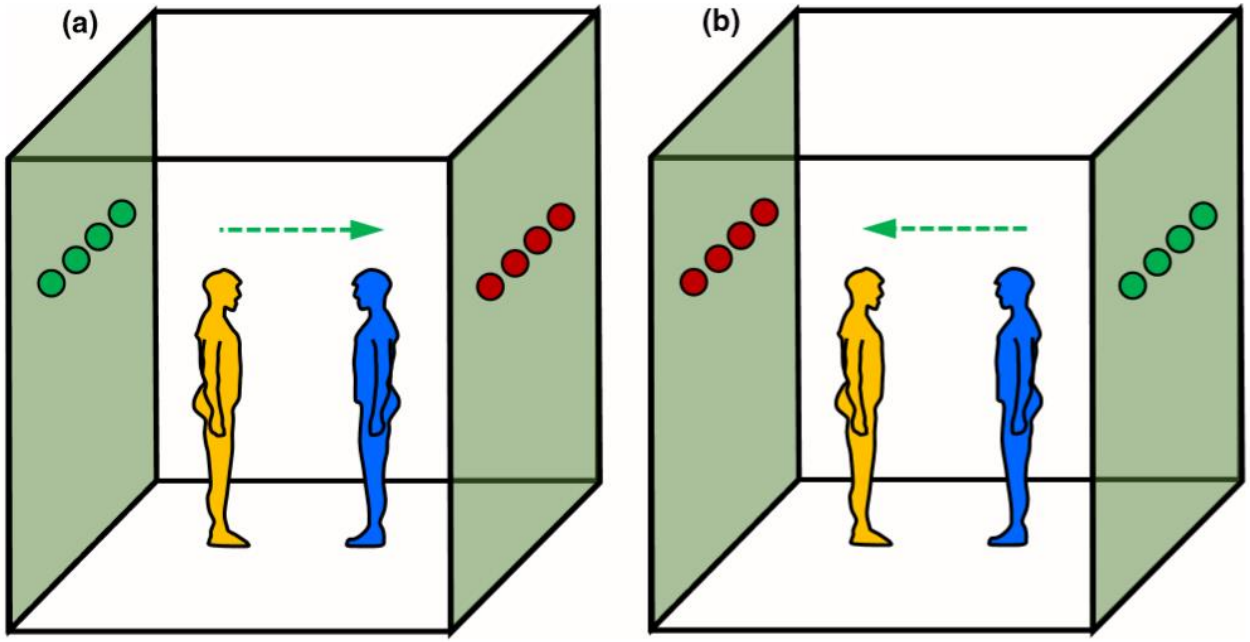


FIGURE 10 Schematic view of 2 possible layouts of the exposed and infected persons in relation to the direction of indoor airflow pattern when stratum ventilation is used

出典
Ai ZT, Melikov AK. Airborne spread of expiratory droplet nuclei between the occupants of indoor environments: A review, *Indoor Air.* 2018;28:500–524.

感染者と非感染者の位置関係が特定されれば、ピストンフロー（手術室）やPush-Pull（診察室、PCR検査室）が適用できる。
そうでない場合はリスクが高くなる場合がある。

4．空調・換気設備ができること－換気

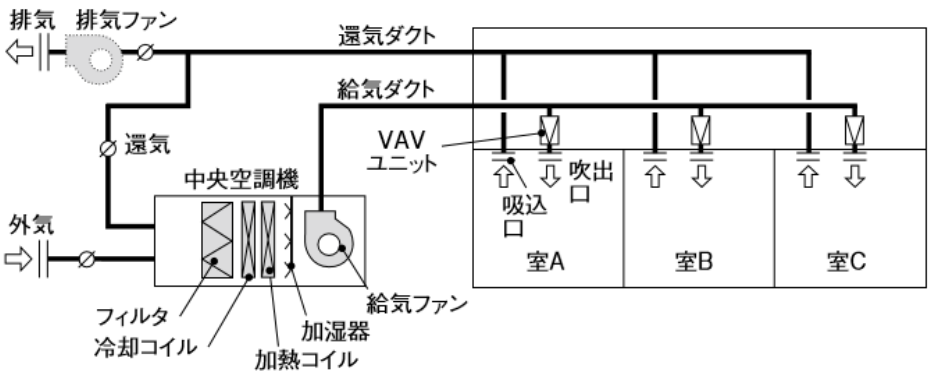
感染症と換気・ろ過の関係　Wells-Rileyモデル

$$P_I = \frac{C}{S} = 1 - e^{-\frac{Iqpt}{Q}}$$

$$P_I = \frac{C}{S} = 1 - e^{-\frac{Iqpt/V}{(\lambda + K_1 + K_2)}}$$

P_I：感染確率 [-]
C：新たな感染者数 [人]
S：感受者宿主数 [人]
I：感染者数 [人]
Q：室換気量 [m³/s]
q：発生量 [quanta/s]（最小感染単位）
p：一人当たり呼吸量 [m³/(人・s)]
t：曝露時間 [s]

V：室容積 [m³]
λ：循環を含めた清浄空気の量と室容積の比[1/h]
K_1：ろ過による感染性粒子の除去 [1/h]
K_2：感染性粒子の沈着量 [1/h]



出典

Wells WF: Airborne Contagion and Air Hygiene. An Ecological Study of Droplet Infections. Harvard University Press, Cambridge, 1955.
The Built Environment Research Group (www.built-envi.com). HVAC filtration and the Wells-Riley approach to assessing risks of infectious airborne diseases—Final Report. 2012.

2．空調・換気設備ができること－換気

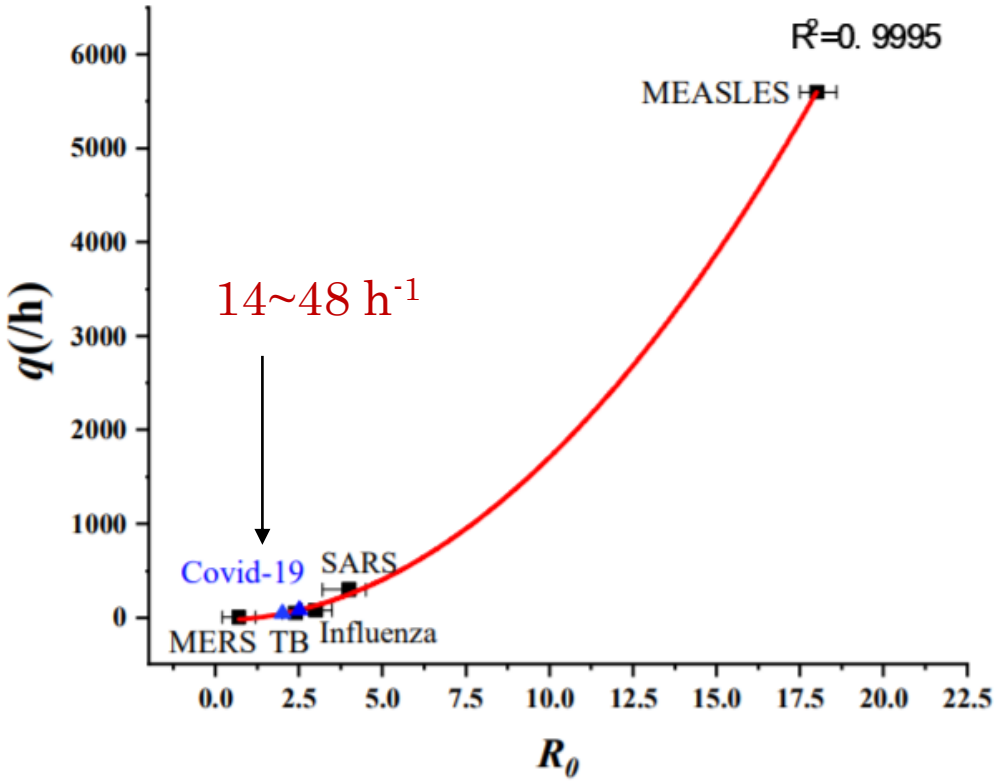
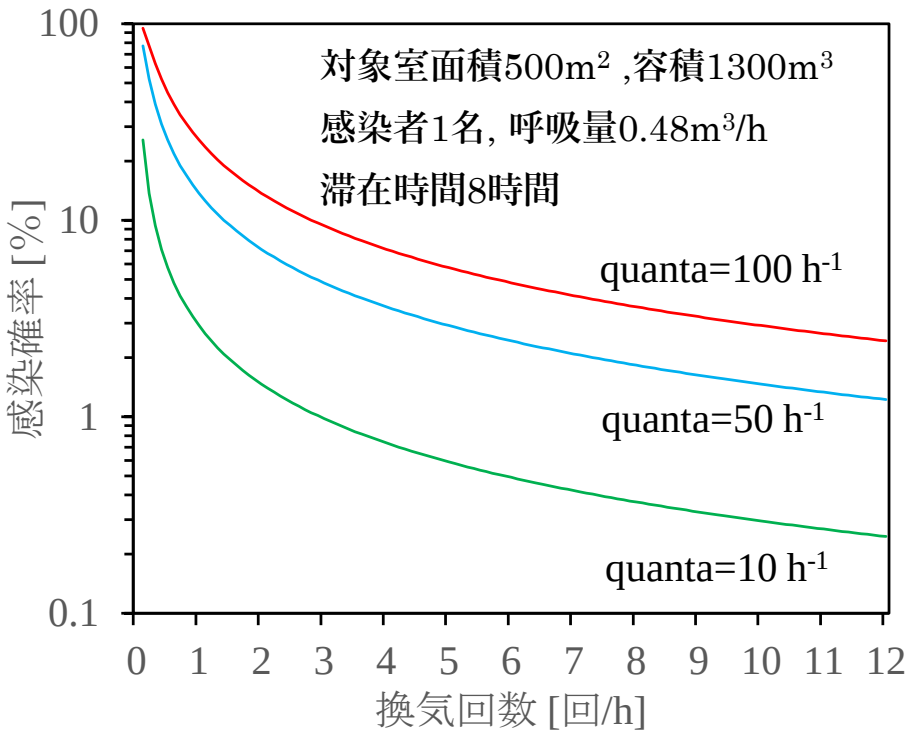


Figure 1. The fitted curve between q and R_0

出典

Dai H, Zhao B. Association of infected probability of COVID-19 with ventilation rates in confined spaces：a Wells-Riley equation based investigation. Doi:https://doi.org/10.1101/2020.04.21.20072397

2．空調・換気設備ができること－換気



病原体	quanta/h	一般的に使用される値	出典
Influenza	≦15～500	67または100が	56）～59）
Rhinovirus	≦1～10		56）
Tuberculosis	≦1～50	13以下	60）～64）
SARS-CoV-1	≦1～300		57）,63）,64）
Measles	≦570～5600	5480	65）,66)

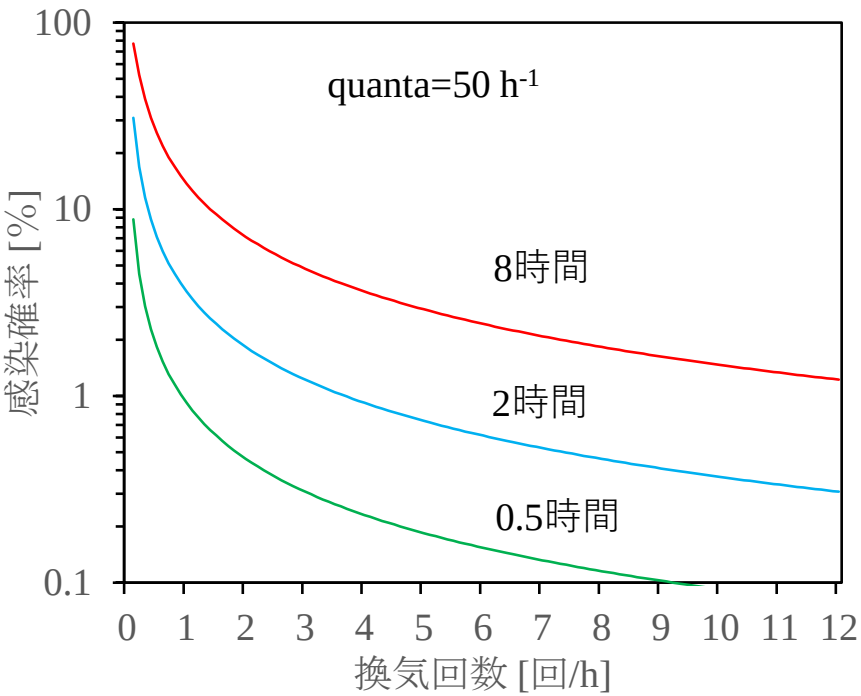
WHOは、換気回数が2 ACH（Air Change per Hour、回/h）以下の場合、非隔離病室で勤務していた臨床スタッフの間の皮膚テストのツベルクリン反応率は高くなると報告している。

WHO. Natural ventilation for infection control in health-care settings. 2009. ISBN 978 92 4 154785 7

シンガポール病院の隔離室での空気サンプルの活性はなかったが，排気口表面からとったサンプルには活性があった。換気回数は12 ACHであった。

Xiang SW, et al.：Air, Surface Environmental, and Personal Protective Equipment Contamination by Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2 (SARS-CoV-2) From a Symptomatic Patient, *JAMA Research Letter*, March 4, 2020 (http://jamanetwork.com/journals/jama/fullarticle/2762692)

2．空調・換気設備ができること－換気



病原体	quanta/h	一般的に使用される値	出典
Influenza	≦15～500	67または100が	56）～59）
Rhinovirus	≦1～10		56）
Tuberculosis	≦1～50	13以下	60）～64）
SARS-CoV-1	≦1～300		57）,63）,64）
Measles	≦570～5600	5480	65）,66)

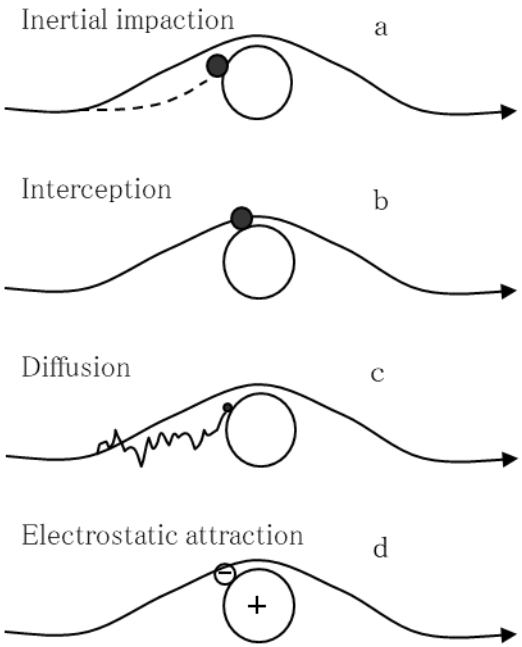
WHOは、換気回数が2 ACH（Air Change per Hour、回/h）以下の場合、非隔離病室で勤務していた臨床スタッフの間の皮膚テストのツベルクリン反応率は高くなると報告している。

WHO. Natural ventilation for infection control in health-care settings. 2009. ISBN 978 92 4 154785 7

シンガポール病院の隔離室での空気サンプルの活性はなかったが，排気口表面からとったサンプルには活性があった。換気回数は12 ACHであった。

Xiang SW, et al.：Air, Surface Environmental, and Personal Protective Equipment Contamination by Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2 (SARS-CoV-2) From a Symptomatic Patient, JAMA Research Letter, March 4, 2020 (http://jamanetwork.com/journals/jama/fullarticle/2762692)

2．空調・換気設備ができること－ろ過



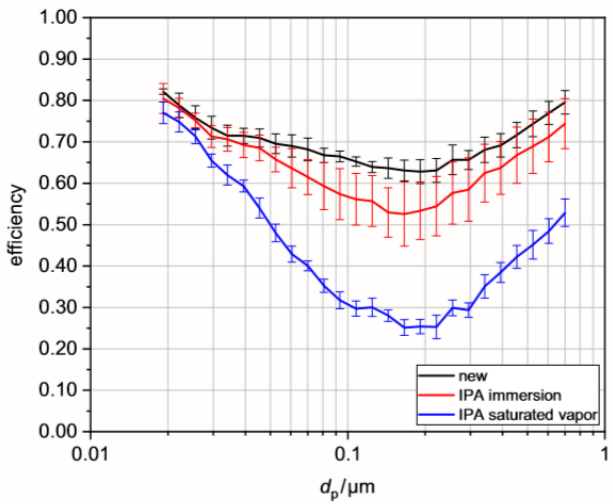
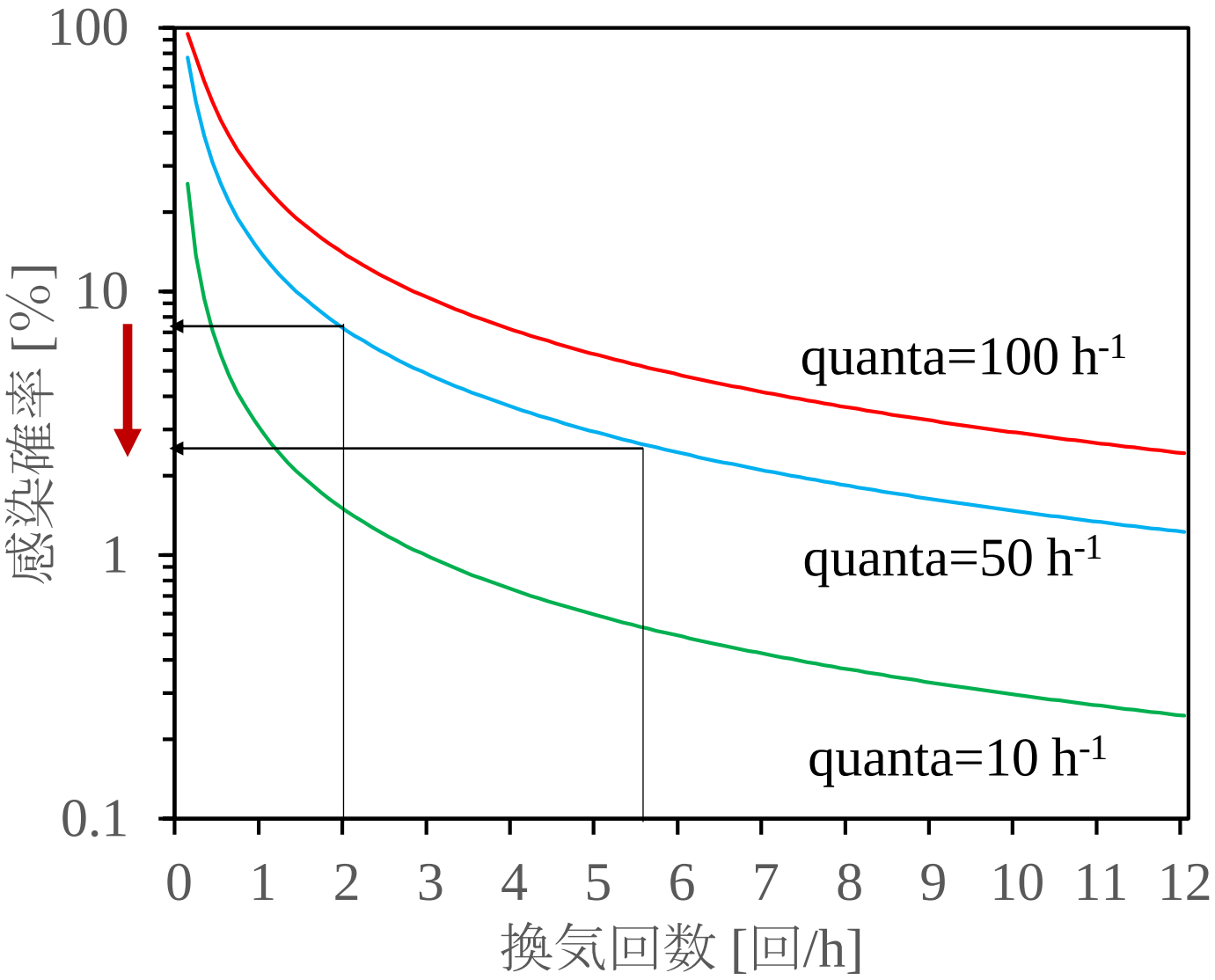


表2 粒径別最小捕集率報告値（MERV）

MERV	0.3-1.0 μm	1.0-3.0 μm	3.0-10 μm
1	n/a	n/a	$E_3<20$
2	n/a	n/a	$E_3<20$
3	n/a	n/a	$E_3<20$
4	n/a	n/a	$E_3<20$
5	n/a	n/a	$20 \leqq E_3$
6	n/a	n/a	$35 \leqq E_3$
7	n/a	n/a	$50 \leqq E_3$
8	n/a	$20 \leqq E_2$	$70 \leqq E_3$
9	n/a	$35 \leqq E_2$	$75 \leqq E_3$
10	n/a	$50 \leqq E_2$	$80 \leqq E_3$
11	$20 \leqq E_1$	$65 \leqq E_2$	$85 \leqq E_3$
12	$35 \leqq E_1$	$80 \leqq E_2$	$90 \leqq E_3$
13	$50 \leqq E_1$	$85 \leqq E_2$	$90 \leqq E_3$
14	$75 \leqq E_1$	$90 \leqq E_2$	$95 \leqq E_3$
15	$85 \leqq E_1$	$90 \leqq E_2$	$95 \leqq E_3$
16	$95 \leqq E_1$	$95 \leqq E_2$	$95 \leqq E_3$

n/a: not available

2．空調・換気設備ができること－ろ過