

論文から考える新型コロナの感染抑制

——空気感染、ワクチン、集団免疫——

吉田賢右

新型コロナの感染は、第一波、第二波、・・・、第五波と繰り返し、後になるほどひどくなっている。率直に言えば、私たちの社会は、蔓延から学ぶところ少なく、未だに感染防御に失敗している。なぜだろうか。

私は昨年「顧問室の窓」で、次のように書いた。

感染を起こすのは唾の飛沫と飛沫核であって、接触感染やエアロゾルによる空気感染は起きていないだろう。混み合った電車、エレベーターでも静かにしている限り感染はおきていない。会話を控えることを条件に、音楽会や美術館はオープンしてさしつかえない。飲み食いしながらの会話や歌や大声で叫ぶことがなければ、屋外の催しも観客を入れて開催できる。買い物の自粛は必要ない。唯一、厳重な管理が必要なのが、会食やパーティ、飲食店、接待店、カラオケ店、介護施設、寮などの食堂、など複数の人の唾がとぶ環境である。

1年たって世界はいろいろな感染の様態を経験し、多くの論文が報告された。それでも、上記の定式は今でも有効だろうか。

接触感染については、この1年、私の知る限り、器物の表面に付着したウイルスによる感染が起きたという確かな論文はなかった。接触感染はほとんど起きていない、ということでは専門家の認識も一致してきていると感じる。行政もあまり「消毒、消毒」と言わなくなった。それでも「店内やテーブルを消毒しています」と感染防御をアピールしているのを見かけるが、それで感染が防げるとの誤解を招きそうで気になる。

感染者の唾を吸い込むことで感染する、ということはほぼ常識として定着した。ただ、唾の粒子には3種類あり、それぞれに感染様式が違う。ただし、境界は連続的であり両方の性質をもつ粒子があるのはもちろんである。

- 飛沫（直径0.1mm以上の目視可能な粒）
飛沫は大きいので乾く間もなくせいぜい数秒で地面に落下する。しかし、感染に必要な数のウイルス粒子（100程度だろう）を含むことが可能なので、接近して口角泡をとばすような状況だと飛沫による感染がおきるだろう。
- 飛沫核（0.1mm以下の粒が水分を失い、もとの直径の20-50%くらい小さくなったもの。注1）
飛沫核は数十秒~数分、空中にとどまる。1つの飛沫核に1-100個くらいのウイルス粒子が含まれていることがあるので、そういう飛沫核をいくつか吸入すれば感染するだろう。

- ・エアロゾル (0.005mm (5 μ m) 以下の微粒子、高速振動する水表面や泡の破裂から生じる) エアロゾルによる感染が空気感染である。普通の湿度なら微粒子はすぐにほとんど乾いてしまうだろう。エアロゾルは何十分～何時間も空中に浮遊する。これだと感染者から煙のようにウイルスがただよってきて息をするだけで感染してしまうかもしれない？

I. 空気感染は起きているか

空気感染が実際に起きているのか、これは感染防御の施策を考える上で、現在の最大の問題である。空気感染が起きている、と主張する最近の論文2つを検討してみる。

(論文1) 影響力のある科学ジャーナル Science に最近「呼吸器ウイルスの空気感染」という論文が載っている。米国シアトルの感染症専門医 Chan さんたちの論文で、自身の実験や観察の報告ではなく、たくさんの他人の論文をまとめた総説で“接触感染はほとんどない、飛沫感染も少ない、空気感染こそ新型コロナなど呼吸器感染のウイルスの主たる感染方法だということ認識すべきである”と結論する。

この論文では、空気感染を直径 0.1mm 以下の呼気に含まれる粒子による感染と定義して論じていることである。これでは、飛沫核による感染も空気感染となってしまう。それなら確かに「呼吸器ウイルスは空気感染する」と結論するのは容易である。しかし、問題は、数時間も空中にただよ直径 5 μ m 以下のエアロゾルで感染が起きるか、起きているのか、ということなので、この論文の中でエアロゾルによる感染に関連している部分だけを選んで紹介する。

1. 会話 (声帯)、咳などでエアロゾルが生じる。大きさはほとんど 1 μ m 以下である。
2. 呼吸だけでもエアロゾルは生じる。息を吐くと肺の一番奥の微細気管支壁が密着して閉じるが次の吸気でまた開く、開くときの衝撃で微細な (0.2-0.6 μ m) エアロゾルが生じ、引き続く呼気で出てくる。数は1リットル当たり数十から数千個である。
3. エアロゾル中にはウイルスが濃縮されており、大きな飛沫よりもウイルスは多い。
4. 0.1 μ m 以下のエアロゾルは気道の奥まで直接ウイルスを送り込み危険が大きい。
5. したがって、会話時にはもちろん、静かに呼吸しているだけでも新型コロナの感染は起きる。

検討：

- 1と2はそのとおりだろう。私は今まで、静かな呼吸だけではエアロゾルは生じないと思ってきたが、最末端の気管支の close-open でエアロゾルが生じることを初めて知った。
- 3については、報告されている実験系では大きな粒子ほど早く除かれてしまって小さいエアロゾルが優先的に残っているサンプルと思われるので、結論を導けない。
- 4では、0.1 μ m 以下の小さなエアロゾルは肺の奥まで侵入して危険だというのが、新型コロナウイルスの大きさは 0.1 μ m ほどあり 0.1 μ m 以下のエアロゾルには入れない。

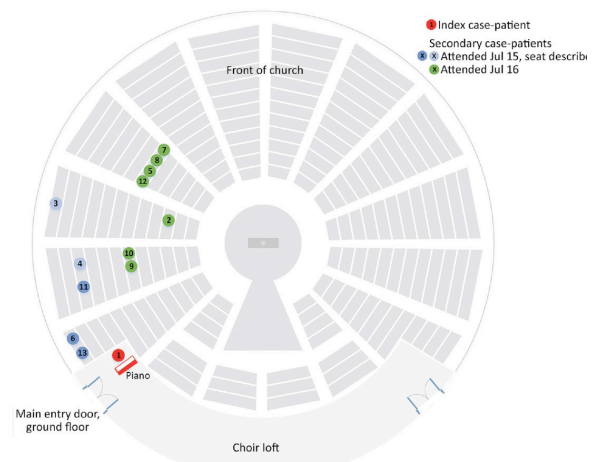
5の結論であるが、エアロゾルの体積を考えれば、呼吸をしているだけで感染が起きることは、ほとんどありえないのではないか。この論文に限らず、エアロゾルによる空気感染を報じる論文は目の届く限り読んできたが、不思議なことに、どれもエアロゾル1つに含むことのできるウイルスの数をまったく考えていない。

以前にも書いたが、 $1\mu\text{m}$ のエアロゾル粒子の体積は約 10^{-12} ml, 唾に含まれるウイルス粒子の数は多くても 10^8 /ml, するとウイルスを含んでいるエアロゾル唾粒子は $1/10^4$ 、わずかに1万個に1つである。気管支から生じるといふさらに小さなエアロゾル($0.5\mu\text{m}$ とする)は、約10万個に1つだけウイルスを含む。人が吐き出すエアロゾルの個数を1分間1万個、感染に必要なウイルス粒子の数を100 (注2)、感染者の呼気の10分の1を吸い込む、として感染が起きるには何十時間もかかる。

この論文は、多数の(206報)論文を引用しているが、エアロゾル空気感染が起きたとしか考えられない、という実例の報告論文は少ない。それでも、中には非常に細かく感染の状況を記録した論文があったので次に紹介し検討してみる。

(論文2) オーストラリアのシドニーの教会で発生したクラスター感染を地域の保健機構の医師が報告している。論文は感染状況について詳細に記述している(他の論文も感染事例についてはこれくらい詳しく報告してほしい)。

感染源となったのは、ミサでピアノを弾き聖歌を歌った18歳の男性で、発症前の感染者であった(右図の赤)。彼は2020年7月15日と16日に各1回、7月17日に2回、計4回の1時間の礼拝で歌っていた。そして18日に発症して感染が判明し、教会は直ちに地域住民にこれを知らせ、ミサ参加者434人がPCR検査を受けた。そのうち12名が陽性だった。15日の感染者が5人(右図の青)、16日の感染者が7人(右図の緑)、17日の感染者はいなかった。ミサはビデオで撮影されており、感染者の座席は確認された。死者はいなかったが



3名が入院し、2名が集中治療を必要とした。この地域ではほかに市中感染がなく、また感染者のウイルスの塩基配列からも、歌手からの感染であることが確認された。

ピアノは会衆から3.5mの高さの聖歌隊用のロフトにあり感染源となった歌手はそこでマイクを使用して歌った。彼はロフトの後ろにあるドアから直接出入りし、会衆に接近することはなかった。ドアも窓も閉め切って換気はなかった。誰もマスクをしていなかった。すべての感染者は歌手から1mから15mの距離に座っていた。

この状況は、空気感染が起きたとして説明できる、と論文は結論する。

検討：歌唱によって3.5mの高さからいろいろな大きさの唾の粒が飛んだはずだ。地上に落下するまでの時間が普通の3倍以上長いので、その間に、乾燥して飛沫核が生じやすく、その飛沫核は普通の数倍の長い距離を飛ぶことができたはずである。歌手から見た感染者の方向が15日と16日で30度ほどずれている。おそらく、ウイルスを含んだ唾を飛ばした瞬間の空気の流れの方向あるいは歌手の顔向きが、15日と16日でわずかに違っていて、唾粒子の飛ぶ方向が違ったのではないか。滞空時間の長いエアロゾルで空気感染がおきたとしたら、会堂全体に感染が広がり、こんな狭い角度方向の感染とはならないだろう。この感染は飛沫核による感染として十分に説明できる。

空気感染を、5 μ m以下のエアロゾル粒子による感染、と定義すれば空気感染は起きていない、と言える。しかし、最近では、論文1のように、目に見えない粒子(まあ0.1mm以下の粒子と言っていいだろう)すべてをエアロゾルと称してその上で エアロゾル感染＝空気感染 と言う専門家が増えているようだ(毎日新聞9月12日電子版 林奈緒美記者の愛知県立大の清水宣明教授インタビュー)。それだと確かに「空気感染は起きている」と言える。しかし、それだとまた、数時間も空中にただよう5 μ m以下の粒子による感染が起きている、と同時に言ってしまうことになり、適切ではないと思う。

最初の疑問に戻る。

なぜ、感染は1波、2波、3波、4波、5波と繰り返し、しかもひどくなるのか？

それは、空気感染が起こっているかのような現在の感染防御政策にある、と思う。

空気感染がなければ、現在のコロナ感染防御の施策のうち「人流の制限」「外出自粛」「三密回避」など人の接触を制限する政策は、(もちろん、結果として会食・飲食などの感染機会を減らす間接的な効果は大きい)それ自体はあまり効果がないことになる。実際、緊急事態宣言は、回を追うごとに効果が減少した。奈良県知事はあけすけに「緊急事態宣言はよそをみてもあまり効果がないからやらない」と述べた。そのとおりなのである。人々は、昨年の春には厳格に外出制限を守った。しかし、外出してもそれだけでは感染しない、人ごみを歩いてもそれだけでは感染しない、混んでいる電車にのってもそれだけでは感染しない、ということを経験して学んだ結果、宣言にもかかわらずわりと平気で外出をするようになった。そして、外出する人の中には唾の飛ぶ環境こそ危険であるという認識の薄い人がある割合でいつも存在し、警戒と対策なしに集まって飲食・会食などをするので感染が広がってしまう。

それで感染者が増加して大変だとニュースで繰り返され、外出を抑制し飲食・会食・酒場などの営業が制限されると、感染は減る。やれやれと宣言が解除されて、酒飲みなどの制限が解除される。するとまた感染が増え始める。そしてまた宣言・・・その繰り返しだったのではないか(注3)。

要するに唾の飛ぶ環境という一番の感染現場の管理が徹底しないままに、空気感染を想定したような一般的な外出制限を厳しくする施策が失敗している。

II. ワクチンと感染の終息

デルタ株ウイルスが出現して、ワクチンの有効性に不安が生じている。実際はどうだろうか。変異株が現れる前の従来株では、ワクチン2回接種者は（非接種者とくらべて）感染する確率は約5%ということだった。デルタ株ではどうだろうか。最近（8月18-20日）の日本の感染者（ほとんどデルタ株）の内訳は、10万人あたりに換算して、ワクチン非接種者89人、1回接種者25人、2回接種者5人だそうである（9月3日毎日新聞）。この時点で2回接種者は全人口の45%であったことを考慮すると、2回接種者10万人あたり感染者は11人、それ以外の人の場合10万人あたり感染者は207人となる。デルタ株でもワクチン2回接種者は（非接種者とくらべて）感染する確率は約5%（11/207）で従来株と変わらない。

これは非接種者と接種者の感染率の比較である。しかし、デルタ株では両者の感染率が同じように増加している可能性が高い。だから従来株にとって代わって蔓延している（注4）。しかし、何倍も感染力があるわけではないだろう。たとえ、従来株と比べてデルタ株の感染力がわずか1.2倍だとしても5回感染を重ねれば、 $1.2^5 =$ 約2.5倍のヒトに感染している。

デルタ株は従来株とくらべて、少ない数のウイルスの吸入で感染する（感染に必要なウイルス粒子数（minimum dose）が減った）ようになったの、体内で複製され排出するウイルス粒子の数が増えたか、そのどちらかあるいは両方だ。どちらにせよ、従来株に比べて、より小さいサイズの唾粒子で感染が起きる。その意味で、空気感染性が増大した、と言っても間違いではないだろう。問題は、どれくらい増大したか、である。

デルタ株においても、こみあった電車の中でクラスターが生じた例はなく、感染者が去ったエレベーターの中で感染が起きたことも聞かない。呼吸だけしている集団でデルタ株の感染が起きた例も私は知らない。だとすると、デルタ株で感染が質的に変化したとは言えないのではないか。

ワクチン接種者の集団感染

米国のマサチューセット州のProvincetownという町でクラスター感染が発生し、感染者の2/3がワクチン接種者だという報道があった。この報道だけだとワクチンが無効のように見えるので驚いた。それで、情報をさがしてみた（Provincetown's Covid Outbreak Shows 'It's Nowhere Near Over' - The New York Times (nytimes.com)）。この町は、住民の95%がワクチン接種を済ませていて（全米トップクラスの接種率）、もうコロナはやっつけた、とみんな思っていた。町はCape Codの海岸の観光地で、2021年7月4日の独立記念日には観光客も含めて6万人も集まって狭い通りと海岸は人であふれかえり大にぎわいだった。みんなマスクをつけていなかった。それから数日後、コロナ感染者がはじめは5人、次には50人、100人と爆発的に増えた。結局、469人の感染が確認され、その2/3がワクチン接種者だった。入院した者はわずか7人だったのはワクチンのおかげだろう。

これでわかった。ほとんどワクチン接種者ばかりの集団で感染が起きたのだ。たしかにワクチンは有効で感染は1/20に減る。しかし、接種者が20倍集まれば未接種者の集団と同じである。ワクチン接種がいきわたった時でも大勢が集まってマスクなしで唾が飛び交えばクラスター感染がおきるのだ。

集団免疫でコロナ終息、まだまだ先だ

たとえ90%の人がワクチン接種を受けても、感染は収まらないだろう。その時、ワクチン未接種者は人口の10%、東京でいえば130万人、大阪で90万人である。それに、接種者の1/20は感染感受性だとすると、これに50万人と40万人をプラスした人口がウイルスの感染対象となる。これだけの人口が集まったウイルス処女地があれば感染は終わらない。イスラエル、英国、米国などワクチン先進国で規制をゆるめたら感染がまた広がったのはそういうことだろう。

Home-test を

感染の蔓延を防ぐ基本は、感染者の発見・隔離（治療）である。日本の専門家・行政は感染者の発見に非常に不熱心だった。従って無症状感染者はまったく把握されず、自由に感染を広げて、市中感染の源になってきた。以前から私は、自分で簡単に検査できる抗原検査を広範に利用することを唱えてきた。

以下、最近読んだ英国の例である（文藝春秋10月号、デヴィ。シュリダールさん（英国政府アドバイザー）のインタビュー記事）。英国では新型コロナの抗原検査キットはどこでも無料で手に入り、政府のサイトに自分の住所をいれるだけでも1日で届く。これだと自宅で唾液をとって30分で陽性・陰性がわかる。とくに無症状感染者（市中感染の元凶）を見つけるのに有効である。外へ出る人は出かける前に検査して陰性であることを確かめて出かける。6月末のテニスのウィンブルドン大会では、入場者は検査結果を通知して観戦した。それで感染クラスターは発生しなかった。

最近の問題

インドでは、ワクチン接種も遅々としているのに、かつての大流行が今、うそのように収まっている。それはなぜか。

日本では関西のデパートで大規模の感染クラスターが起きた。空気感染とも言われているが、詳細がどこからも明らかにされていない。

注1. 唾には0.5%ほどタンパク質や塩が含まれているので、水は完全に蒸発することはない。99%の水分を失って直径がもとの20%くらいになったあたりで空中の水分と平衡してそれ以上小さくならない（20%<湿度<80%）(Linse CN, et al, Mechanistic insights into the effect of humidity on airborne influenza virus survival, transmission and incidence. *J. R. Soc. Interface* (2019) 16: 20180298. <http://dx.doi.org/10.1098/rsif.2018.0298>)

注2. ヒト感染に必要な最少ウイルス粒子の数(1つのウイルス粒子が感染に成功する確率)は COVID-19 についてわかっていない。100 という数字は前回の SARS についての推定値である。また、空中で乾いたウイルスがどれくらいの時間、感染性を保つのか、調べた論文を知らない。どちらも感染防御を考える上で非常に重要な情報である。感染症の専門家に研究して欲しい。

注3. 乱暴に例えれば、これは交通事故(感染)を減らす目的で、車の速度を時速 30km 以下に規制する(外出抑制)ようなものである。それはたしかに効果がある。しかし、あまりにも不便なので、50km で走る車が現れる。当局も厳しく取り締まると経済産業にダメージが大きいのではほとんど見逃す。それを見て多くの車が 50km で走るようになる。そのうちに 100km で走る車(会食・飲食・歌)が現れて事故(感染)を起こす。すると当局は、また時速 30km を守りましょうと訴える(非常事態宣言)。以下、くりかえし。

注4. デルタ株が従来株に置き換わっていく様子は、進化において 1 匹に生じた有利な変異が世代を経るに従って集団に定着してゆく様子に似ている。有利な変異は小さな集団には早く定着する(失われることもあるが)。大きな集団に定着するには時間がかかる。逆に、定着する時間からその集団の大きさが見積もれる。すると、デルタ株がドミナントになるのにかかった時間経過から、感染対象集団の大きさが割り出せるのではないか。もちろん仮定が多く入った計算になるが、感染し感染させる人たち(感染ゲームの参加者)が人口のどれくらいになるのか、ヒントになるように思う。理論疫学者の方、どなたか計算してください。

論文 1

C. C. Chan, et al., Airborne Transmission of respiratory viruses. *Science*, 373, eabd9149 (2021) 27 August 2021

論文 2

A. L. Katelaris, et. al., Epidemiologic Evidence for Airborne Transmission of SARS-CoV-2 during Church Singing, Australia, 2020. *Emerging Infectious Diseases* • www.cdc.gov/eid • Vol. 27, 1677-1680 June 2021