

〔特集〕新型コロナウイルス感染症の拡大防止に貢献する流体力学

感染を予防する工学ワクチンという考え方

京都工芸繊維大学 機械工学系

山 川 勝 史*

The Idea of Engineering Vaccine Preventing Infection

*Masashi Yamakawa, Mechanical Engineering, Kyoto Institute of Technology

*E-mail : yamakawa@kit.ac.jp

1 はじめに

新型コロナウイルス SARS-CoV-2 による呼吸器系疾患の流行が始まってから既に1年半が経過しようとしている。昨年11月頃から始まった第3波の落ち着きとワクチン接種の進展により、コロナ禍からの回復への期待が日々高まってきてはいるものの、まだまだ楽観視出来ないのも事実である。一方、このような新型ウイルスによるパンデミックは過去数十年に一度という比較的高い頻度で繰り返されており、100年程も前のスペイン風邪での経験は致し方ないとしても、2002年のSARSや2012年のMERSでの教訓は十分に生かされたはずである。にもかかわらずリーマンショックを超える世界経済の落ち込みと数百万人という死亡者を発生させており、現代における未曾有の人的災害と言っても過言ではない。なお、現時点での最良のシナリオである来年度までの全人類へのワクチン接種によるCOVID-19鎮圧が実現したとしても、それは対処法によるものであり最善策であるとはいえない。これまでの状況をしっかりと分析し、今から準備をしておかなければ、恐らく数十年後の次期新型ウイルスによるパンデミックにおいて同じ歴史が繰り返されることになるであろう。今現在はこのコロナウイルスに全力で対応しないとイケないが、同時に次期ウイルスに対する準備（つまり一般化した新型ウイルス対策）が必要であると考えます。

さて、この表題に記載している「工学ワクチン」はエンジニアの立場から考えた感染を予防する手法のことであり、不活性ウイルス等を用いることで体内に作り出した抗体により感染予防を行う従来の医薬ウイルスに対抗して著者が名付けたものである。具体的には流体力学を利用したものであり、感染者と被感染者に存在する空気（気流）を制御することによりウイルスの移動を阻止しようとするものである。一言でいうと換気であるが、それでは元も子もない。もう少し緻密な計算に基づいた効

率的な換気としたい。ただしウイルスに対する安全性を考慮すると、その開発手法としての計算流体力学は最適であると言える。またこの工学ワクチンを気流制御による感染防止策と定義するならば、数値シミュレーションによる感染経路の特定や飛沫拡散抑制手法の提案もまた工学ワクチンの一種ということになる。

2 流体工学ワクチンについて

2.1 新型インフルエンザのパンデミック

流体工学ワクチンの始まりは今から10年程前に遡る。2009年に発生した新型インフルエンザ（H1N1型：通称豚インフルエンザ）は、特にメキシコにおける流行直後の致死率が6%を超えると共に多くの犠牲者を出した。さらにこのパンデミックは2012年の段階で全世界の死者数は30万人近くに達していた。国内においても第1号の患者が出た頃から連日報道番組で取り上げられ、今回の新型コロナ同様の騒ぎであったのを覚えている。幸い日本においては若い方を除く多く世代において、このウイルスの抗体保持者が確認され大事には至らなかった。さらに感染者の増加とともに致死率が季節性インフルエンザ程度まで大幅に低下すると、パンデミックを克服というよりそのものが無かったかのように日常へと戻っていった。国内ではまさに“只の風邪”として人々の記憶から消え去ってしまったようである。

もし人類が抗体を持たない新型ウイルスのパンデミックが起こったらどうなるのか？この疑問から流体工学ワクチンの開発が始まることになる。豚インフルエンザ流行の直後であったことから、まずパンデミックを引き起こすウイルスは新型インフルエンザとした。具体的には2003年頃から局所的に発生していた鳥インフルエンザ（H5N1型）を想定すると、致死率は当時50%を超えており、感染力を季節性インフルエンザと同程度としても、冬季の1シーズン（10週間）に1,000万人を超す患者が

発生することになる。感染の繰り返しによるウイルス変異により通常弱毒化されるので、致死率を1桁下げたとしても、毎週100万人の感染者と5万人の死者が発生する計算になる。感染症の隔離に効果が高い陰圧室は10年前では2,000床程度であったと記憶しているが、とてもカバーできる数ではない。また全国の一般病床と療養病床の半分を新型インフルエンザ患者に振り分けられたとしても、毎週50万人の入院できない患者が溢れることになり、この時点で医療は崩壊することになる。ここまですべてが新型インフルエンザのパンデミックが勃発した時のあまり良くないその頃考えていたシナリオであった。

2.2 自宅療養で考えるべきこと

これら入院できない患者について、新型コロナにおいては軽症患者に対しホテル療養という選択肢が導入されたが、それまでは入院できない患者は一般的には自宅療養となる。病院では感染対策のための設備を有し、また感染に対する知識を有する医療関係者により患者が扱われるため、患者からの2次感染の確率はあまり高くない。一方、自宅療養における最大の懸念は家庭内感染であり、この部分を克服しなければ死亡者数の顕著な増加だけでなく、国そのものの機能不全も視野に入れなければならないであろう。

ではどうやって自宅で患者を診るのか？患者が大人の場合には、患者と家族との接触そのものを極力下げることが可能であろう。しかしこのパンデミックは豚インフルエンザ時の経験がベースとなっているため、患者の大半は子供である。未知のウイルスに犯されている我が子を一人部屋に置き去りにすることはまず無理である。また重病中の子供にとって咳エチケットを実施できる期待値は限りなく0である。結果、看病する部屋（子供部屋）はこの未知のウイルスが充満していると考えべきである。勿論この時点で新型インフルエンザのワクチンは存在しないため、感染対策としてはこのウイルスを如何にして部屋から取り除いてやれるかに尽きる。

さて、専門的な医療設備が皆無な一般家庭の部屋において、空気感染、つまり部屋中に浮遊しているウイルスから身を守るためには、誰もが行うのが換気であろう。窓を全開にして外の空気と入れ替えるのである。自分が子供の頃には、風邪やインフルエンザの弟達への感染を防ぐために、母親がよく部屋の換気をしていたのを思い出す。インフルエンザは空気感染しないのでは無かったろうか？にもかかわらず、未だに感染防止のための換気はこの新型コロナ以前より当たり前の様に実施されていたのだ。少し話が逸れてしまったが、一般家庭において感染メカニズムが分かっておらず、特に空気を媒体とする感染の恐れがある病気の患者を見る場合、換気を行うことが最も期待でき、また看病する側にとっても感覚的

に安心感があるのがこの方法であるといえる。勿論、コロナ以前より学術的な観点からも換気について議論^{1,2)}されていたのは確かであり、またコロナ流行後には換気と感染に関する数多くの論文³⁻⁵⁾も公開されている。

2.3 流体工学ワクチンの考え方

流体工学ワクチン、幾つかの書面では流体エンジニアリングワクチンと記述しているが、この呼び方を初めて使用したのは恐らく7年程前であったと記憶している。流体工学を応用することで感染を未然に防止する手法という意味を持たせてはいるが、要するに換気である。ただし、感染に関わるウイルスの振る舞いをまず精度よく捉え、その上で換気扇やエアコンの気流を制御することにより、患者から被感染者へのウイルスの飛翔ルートを効率よく遮断してやることである。単純に窓を開けてウイルス飛沫を排出するのではなく、換気による室温低下（夏場は室温上昇）を抑制しながらエネルギー的にも人の感覚的にも優しいものにする必要があり、計算流体力学を応用すればそれが可能であると考えていた。

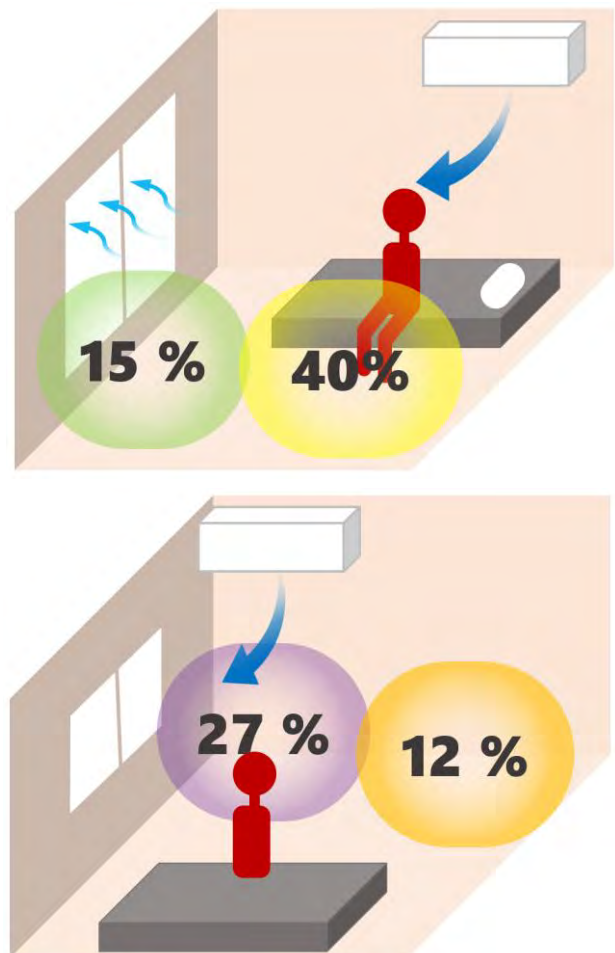


図1 流体工学ワクチンの概略図

図1に極基本的な流体工学ワクチンの概略を示す。例

えば上図では、エアコンの真下に患者がいるベッドが配置されており、患者から見て右側に比較的大きな窓がある。室内の気流はエアコンの強さと窓内外の圧力差により決定され、この気流により患者が発したウイルス飛沫の飛翔ルートが求まる。どの程度のウイルス飛沫を吸い込むと感染するかなど医学的知見は別途必要にはなるが、例えば被感染者の1時間の滞在による感染確率は、被感染者に到達するウイルス飛沫数により定性的ではあるが、予測することができる。患者の正面に位置すれば40%の感染率であるが、窓横の場所に移動すれば15%まで低減できるといった具合である。また図1下のように、患者が座するベッド位置や窓の大きさ、エアコンの相対位置や気流の強さなどを変更することにより、室内における感染確率は更新されることになる。このように室内における気流計算を実行し、またその気流を支配するエアコンや換気扇を調整することや、患者の位置を変更することにより、感染リスクの低減を提案することに繋げることが期待できる。実行再生産数を1とかなり低く仮定した上で、感染確率を10%程度でも低下させることができれば、毎週2,500人も命を救うことになる。これがパンデミック直後からその感染低減効果を発揮できる流体工学ワクチンの一番の狙いである。またこのワクチンは空気を媒体とする感染により広まるあらゆるウイルスに対して効果が期待でき、またウイルスが発現する何年も前から準備を進めることもできるのである。

3 ワクチンの製造方法

3.1 気流計算と飛沫計算

さて流体工学ワクチンの作り方である。咳や会話などにより患者から発せられるウイルス飛沫が被感染者に到達しないように、その飛翔ルートを正確に求めるのがワクチン製造の第一歩である。まず室内における気流計算を行う。これは室内のエアコンや換気扇、また人の呼吸や咳などにより生じる流れを非定常流として解く。取り扱う飛沫そのものが非常に小さいこと、および大量の飛沫の動きを同時に計算させる必要があること、などからOne-wayモデルを採用しているが、勿論これに限定されるものではない。気流計算とそれにより影響を受ける飛沫の動きを計算すれば良いが、現在本研究で採用している手法についてはその一例として文献⁹⁾に詳細を記述しているので参考にされたい。

気流計算と飛沫計算については勿論精度と分解能が高いに越したことは無い。しかしながら大半の方に行き渡ってこそその効果が発揮できる医療ワクチン同様、工学ワクチンについても多少の効果を犠牲にしても多くの現場（国内の多くの住居環境）で実現できてこそ意味がある。という訳で計算そのものの効率化も踏まえた上で気

流や飛沫の計算手法の選定や構築が必要となるのである。またこれらは工学ワクチン製造のスピードに直結するため、ある意味計算精度より重要なファクターになりえるのである。

3.2 工学ワクチンの現状

流体工学ワクチンを実用展開するために、3つの段階を考えている。第1ステップは試作である。ワクチン効果の評価、気流を制御するためのパラメータの選定、および多数計算のための手法を検討しこの段階である程度決定したい。現在はこの第1ステップに取り組んでいる最中であり、計算対象として少人数制の教室を選んでいる。

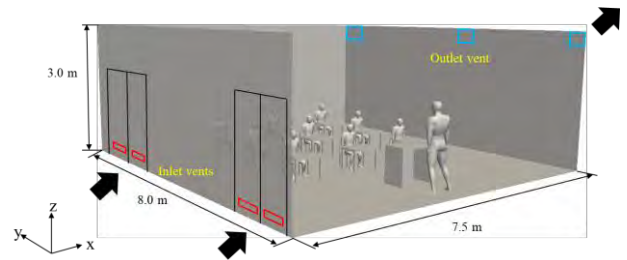


図2 教室モデル

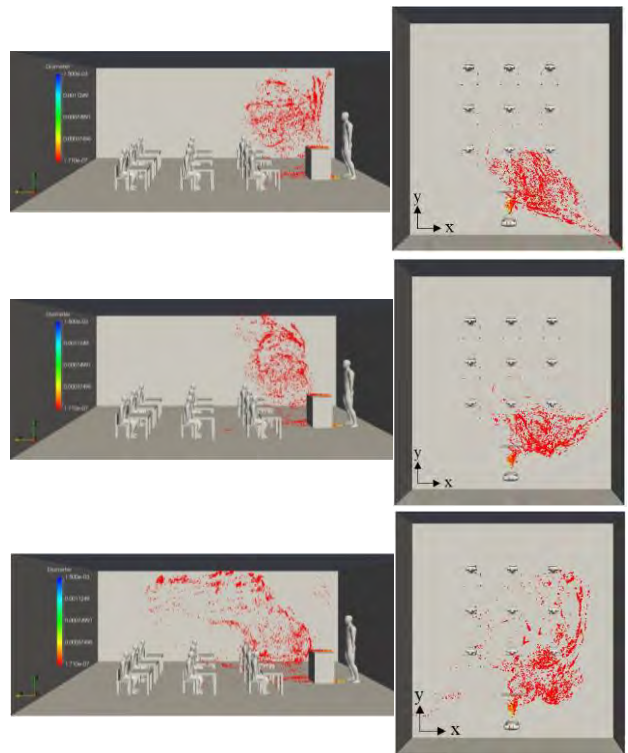


図3 教室における飛沫拡散状況の違い。上から換気口位置を教師側、中央、後方と変化させた場合の $t=400s$ におけるウイルス飛沫の飛散状況（左：全体図、右：上面図）を示している。

図2に教室の概要を示している。生徒9名に直面して教師が咳をし、その飛沫による感染リスク評価と、気流

制御によるリスク低減法評価、それぞれの検討である。教室の入口扉下方に4つの吸気口を備え、反対側の壁上方に換気口を設けている。一例として換気口位置の違いによる飛沫状況の違いを図3に示している。図3より、当然ではあるが換気口の位置へ変更することによりウイルス飛沫の拡散状況は大きく変化する。また教室後方の換気口を使用すると教室全体に飛沫が広がっている、つまり後方の生徒についても感染リスクが上昇しているようにも見えるが、一方で最前列の生徒については飛沫濃度が薄まり、リスクを低減させているようにも見える。これらの評価は具体的にリスクを評価すべき時間スパン、例えば中学校の教室を対象とするなら授業時間である45分間において、例えば各生徒への飛沫付着数をカウントすることで実施できる。この場では各々の条件における評価結果や議論は行わないが、感染リスクの評価が可能であるということは理解して頂けると考える。

次に多くのケースについての評価結果が必要となる。最終的には全家庭における居室が対象となるので、個々に計算をするわけにはいかない。そこで予め用意した数百万程度の結果から近いものを検索するのが実用的であろう。しかしながらある程度の自動化を前提としても、実際にモデルを作成し計算するのは数万の規模が限界である。そこで現在のところ機械学習を使って結果総数の増加を考えている。最終的には、詳細な流れ場や正確な飛沫経路より感染リスクの高さが分かれば十分であるため、リスクレベルが閾値を超えているか否かのみを判断できる結果の収集を目指す。今回のような教室における計算は600万程度の要素数を用いており、PCを用いての1ケース計算に大凡3週間を有している。そのため機械学習を用いての計算結果数増加の可能性についてのみ検討を行った。まず換気口位置と換気風速の組み合わせから39通りの計算を実施し、そのうち26個を訓練データ、残り13個を評価データとして使用した。リスク評価は教師前に座る一人の学生を対象として、本学生の口付近から0.6m以内に到達したウイルス飛沫数をカウントして行った。その他詳細は割愛するが、感染リスクの有無のみを予測する分類問題についても、感染リスクの程度を予測する回帰問題についても各々評価誤差が10%以下であり、現時点では機械学習により計算結果を増強する可能性は示せていると考える。

3.3 工学ワクチンの今後

前節で説明した第1ステップを経て、第2ステップではそのプロトタイプの実現を目指す。ターゲットとして教室よりは多様化しているが、ある程度の規格化において利用されている可能性が高いオフィスを選んでいく。

国内の代表的なオフィスを抽出し、パラメトリックスタディのための条件出しをほぼ終えている。ケース数はおよそ13,000であるが、今後計算結果に応じてさらに増加させる可能性はある。機械学習による増幅後は100万ケース程を狙っている。プロトタイプが完成すると、いよいよ最終ステップである一般家庭に目を向ける。部屋の作りは単純化されるかもしれないが、GPSを使用しての外気温、風速等の気候条件も導入していく予定ではある。

4 おわりに

前述の通り、流体工学ワクチンの概念を思いついてから既に7年も経過している。本格的に取り組み始めたのは、やはり新型コロナウイルスが始まってからになる。危機に直面しないと中々ドライブが掛からないものではあるが、いざ始めてみると次々と問題が発生し、一つ一つ潰しながら進めているのが現状である。今回の新型コロナウイルスも一般的なコロナ同様、変異を繰り返すので医薬ワクチンも重症化はある程度低減できても劇的な予防効果はあまり期待できないのではと思う。結局のところ、マスクや換気などこれまでの感染防止策とはしばらく付き合っていくことにはなるであろう。完全な日常を取り戻すまでには、まずこの工学ワクチンを完成させ、次の新型に対しては万全の体制で臨みたいものである。

引用文献

- 1) Atkinson, J. *et al.*: Natural Ventilation for Infection Control in Health-Care Settings, *WHO Library Cataloguing-in-Publication Data*, (2009).
- 2) Hobday, A. R., Dancer, J. S.: Roles of sunlight and natural ventilation for controlling infection: historical and current perspectives, *J. Hospital Infection*, 84 (2013) 271-282.
- 3) Aviv, D. *et al.*: A fresh (air) look at ventilation for COVID-19: Estimating the global savings potential of coupling natural ventilation with novel radiant cooling strategies, *Appl. Energy*, 292 (2021) 116848.
- 4) Bhagat, K. *et al.*: Effects of ventilation on the indoor spread of COVID-19, *J. Fluid Mech.* 903 (2020).
- 5) Morawska, L. *et al.*: How can airborne transmission of COVID-19 indoors be minimized? *Environment International*, 142 (2020) 105832.
- 6) Yamakawa, M. *et al.*: Computational investigation of prolonged airborne dispersion of novel coronavirus-laden droplets, *J. Aerosol Sci.*, 155 (2021) 105769.