

2.8.4 環境リスク学的感染症防御

(1) 研究開発領域の定義

環境工学、リスク学の知見や建築環境、空調・換気の視点を生かした感染症対策を記述する。感染症が成立する3要因「病原体：感染源となるウイルス、細菌等」「感染経路」「宿主：人間、動物」のうち、感染経路の対策を扱う。感染経路の評価、不活化、希薄化、気流可視化、実効性検証、影響予測、費用便益（コベネフィット/トレードオフ）、リスクコミュニケーション、包摂的リスクマネジメント、リスク表現検討などを扱う。病原体の建築環境内での拡散特性や居住者への暴露リスクの把握、そのリスクを低減するための建築環境や空調・換気設備の方策などを対象とする。感染経路に関係する公衆衛生は含み、病原体そのものの理解を得る基礎生物学や生物情報学的内容、免疫応答やワクチン開発、普及などの臨床医学、生理学的内容は参照に留める。新型コロナウイルス（SARS-CoV-2）による新型コロナウイルス感染症（COVID-19）を主に扱い、将来の社会の脅威となる感染症対策、レジリエンス向上に資する範囲を対象とする。

(2) キーワード

COVID-19、SARS-CoV-2、呼吸器系感染症、感染性エアロゾル、感染経路、定量的微生物リスク評価（QMRA）、建築環境、空調、換気、気流計画、ろ過、紫外線照射殺菌（UVGI）、下水疫学、解決志向リスク評価、新規ウイルス病原体訴求制度（EVPC）ウイルス対策製品、ウイルス不活性化技術と作用機序

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

この100年間でパンデミック（感染症の世界大流行）は断続的に発生している。21世紀に入ってから約20年で、重症急性呼吸器症候群（2003年、SARS-CoV-1）、新型インフルエンザ（2009年、H1N1、パンデミック）、中東呼吸器症候群（2012年、MERS）、新型コロナウイルス感染症（2019年、SARS-CoV-2、パンデミック）と4度の感染症の流行が既に起きている。

2019年12月に始まったCOVID-19は、2023年3月時点でいまだに収束せず、3年を超える累積数では、世界の確認感染者数6億人以上、確認死者数680万以上、国内の確認感染者数3300万以上、確認死者数7万2千以上と膨大な規模である。この3年に及ぶパンデミックは、社会と経済に深刻なダメージを与え、COVID-19および新興感染症に関する対策と準備の重要性が増している。ロックダウンに代表される強い規制から個人の自由意思に基づく対策実施まで、国や状況に応じて規制の在り方は多様だが、諸対策が感染リスク低減にどの程度寄与し、どのくらい社会的費用が生じるのかは十分に理解されていない。新たな変異株が次々と登場し、ワクチン接種状況も刻一刻と変わる中で、感染場面や感染経路に応じたウイルス曝露量と感染リスクの評価、マスク着用、換気、ワクチン接種、行動制限などの個人レベルから政策レベルまでの諸対策がもたらす効果と費用の理解が大切である。対策実施に関する情報発信や対話がどの程度対策実施につながるのかといった評価も重要である。

諸対策がもたらす二次的な影響も重大なリスク事象である。二次的な影響は例えば、感染症以外の心身の健康、経済、学力、ウェルビーイングなどである。感染症とそれに伴う二次的影響も含めた効果的なリスク対策が必要である。多様なリスク事象を対象としながら、どのくらいのリスクが生じるかといった問題焦点型のリスク評価のみならず、どのような対策や選択肢の実施、その情報発信・対話が効果的かといった解決志向のリスク評価のアプローチの深化が求められている¹⁾。本領域は、COVID-19の全数把握に関する転換が進む中で、COVID-19や様々な感染症の状況を空間的・時間的に把握し、諸対策やその情報発信・対話が感染症とそれに伴う二次的影響についてどのような低減効果をもたらし、どのような費用を発生しうるのかを解明し、最終的には感染症に対する普遍的な科学的知の基盤形成に貢献する。今後新たに出現する呼吸器系感染症の対策のためにも、COVID-19の環境リスクを分析し、感染症の予防対策の向上、改善は社会的・経

済的において極めて大きな意義を持つ。

【研究開発の動向】

感染源となるウイルス、細菌等の病原体、人間や動物の感受性宿主、感染経路の3要素が揃い、閾値を超えた病原体の量に暴露されると感染が成立する。感染症対策の基本は、その3要素のどれかを絶つことであり、環境工学、空調・換気設備における主な対策は感染経路の対策となる。

WHOは2020年1月7日にSARS-CoV-2による感染拡大は「国際的に懸念される公衆衛生上の緊急事態」と警告、3月11日にパンデミックを宣言、3月28日にCOVID-19の「空気感染はない“Fact Check: Covid-19 is not airborne”」と主張した。WHOは初期にはCOVID-19の感染経路は接触感染と飛沫感染で、空気感染はないとみなしていた（※本領域では空気感染にエアロゾル感染を含むものとして記述する）。接触感染と飛沫感染は一般に感染者近傍で起きるため、換気による制御ができない。換気は空気感染の対策方法である。しかし、日本では初動の調査報告などに基づき、2020年3月9日以降、厚生労働省等から換気の悪い密閉空間での危険性と注意が呼びかけられた。それに応じて、2020年3月23日に公益社団法人空気調和・衛生工学会と一般社団法人日本建築学会は連名で換気について「会長緊急談話」を発表し、継続的に情報発信し、所属する国内研究者らも国際専門誌に総説などを掲載している^{2), 3)}。

海外では、パンデミック初期から感染経路について多くの研究成果が報告された。接触感染は、ウイルスの活性とその対策である表面消毒が重要となる。表面でのウイルスの活性の維持期間について、NIHの研究チームがSARS-CoV-1とSARS-CoV-2で比較実験した結果、ステンレス鋼とプラスチックでは3日間、段ボールでは1日未満、銅では4時間未満維持された⁴⁾。ウイルスが表面で長時間の活性を保てることは接触感染のリスクが高く、表面消毒が重要なことを意味する⁵⁾。しかし、その後の複数の研究報告で、COVID-19は接触感染のリスクが小さいと指摘された^{6), 7)}。米国CDCは接触感染のリスクは1万分の1以下で、過去24時間以内に感染者のいない環境、屋外環境での1日1、2回の表面消毒は推定リスクの低減にほとんど影響を及ぼさない見解を2021年4月に公表した⁸⁾。現在、接触感染は一般的な生活環境ではCOVID-19の過半の感染経路ではないとみられている。

飛沫感染について、100 μm 以上の飛沫の粒子の到達距離は1~2 mであるため、マスクの着用や物理的な距離の確保が有効な対策となる。

エアロゾル感染に関しても、世界では流行初期から多くの調査研究が実施、報告された。エアロゾルは、気体中に浮遊する微小な液体、固体の粒子と周囲の気体の混合体を指す。大きさは長径0.002~100 μm ⁹⁾や0.001~100 μm ¹⁰⁾とされる。中国広州のレストランでの集団感染事例¹¹⁾、米国Skagit Valley合唱団リハーサルの集団感染事例¹²⁾など、COVID-19が密閉空間でエアロゾル感染経路を有する示唆が蓄積された。COVID-19発生当初にWHOが空気感染は無いとした見解に対し、「SARS-CoV-2の空気感染：世界は現実を直視すべき」という報告もなされた¹³⁾。これらの研究によって、COVID-19の最初の感染者が確認されてから2年も経過した後だが、WHOがエアロゾル感染も重要な感染経路の一つと認め、感染対策指針等に掲載された。我が国でも2021年11月2日に厚生労働省が公表した“新型コロナウイルス感染症COVID-19診療の手引き 第6.0版”にエアロゾルも主要感染経路の一つと明記された。2021年12月23日にWHOはCOVID-19の感染経路について長距離エアロゾル伝播（long-range aerosol or long-range airborne transmission）があると初めて認めた¹⁴⁾。2022年3月28日、国立感染症研究所はCOVID-19の主な感染経路の一つとしてエアロゾル感染を挙げた¹⁵⁾。

空調・換気設備におけるエアロゾル感染の基本的な対策は換気である。換気量と同様に気流計画も重要である。2022年7月14日に新型コロナウイルス感染症対策分科会が公表した「第7波に向けた緊急提言」¹⁶⁾の“5つの対策”の1つで“効率的な換気の提言”が示された。換気量が十分に得られない場合、空気清浄機の利用が有効と記されている。空気清浄機を通過した後のクリーンな空気量は相当な換気量となる。同提言には有効な気流の流れの例が示されている。

リスク学の観点に基づいた、COVID-19に関する対策の効果を理解するアプローチにはいくつかある。

第一に、感染者数やその実効再生産数と諸対策（例えば、人流抑制措置）の有無との関連を議論する方法である。SIRモデルなどを用いて対策の評価をするアプローチもその方法の一つとしてとらえられる。SIRモデルは感受性保持者、感染者、免疫保持者のコンポーネントを想定することで、感染症を決定論的に記述する。しかし、指数関数的増加を想定するモデルは国や都道府県全体といった大集団の感染状況を長期的に説明するには限界がある。ウイルスの特性や人の心理なども考慮したモデル開発が重要となっている。

第二に、感染の有無や諸対策の関連を議論する疫学研究的アプローチがある。例えば、症例対照研究や横断研究などの観察研究によって、飲食や買い物やスポーツ観戦などの様々な場面毎のリスクの評価やマスク着用、手洗い、フィジカルディスタンス、ワクチン接種などの予防効果を評価するアプローチから、介入研究によって、各諸対策や行動がもたらすリスクあるいはその予防効果を評価するアプローチがある。例えば、コミュニティ内のマスク着用などの啓発活動¹⁷⁾、大規模集会への参加¹⁸⁾などがある。

第三は、定量的微生物リスク評価（Quantitative Microbial Risk Assessment : QMRA）である。空中や環境表面中のウイルス濃度の測定とともに呼吸や接触回数などの人行動を考慮することでウイルス曝露量を評価し、用量反応式に基づいて感染リスクを評価するアプローチと、感染者から排出されるウイルス量から非感染者への感染リスクをすべてモデルで表現して評価するアプローチがある。モデルには、感染者1人と非感染者1人といった少人数を想定したものから大人数を想定したものもある。また、スーパーコンピューターを用いて環境中のウイルスの動態を精緻に計算する事例¹⁹⁾や実際の現場での人行動を観測することでモデル評価に活用する事例²⁰⁾がある。これらの方法は感染経路別のウイルス曝露量を推定できるため、マスク着用、換気や消毒といった諸対策のリスク低減効果の評価を可能とする利点がある。変異株の台頭とともに、感染者からの飛沫・飛沫核の粒径ごとのウイルス排出量、環境中の不活化、用量反応式、感染リスクと抗体価の関係などについての知見の更新の必要性が増している。さらに将来的な未知の病原性微生物感染症の流行とその対応や準備を考えると、多様な病原性微生物を対象とした普遍的なQMRAの開発が重要である。

感染症関連の二次的影響は多様で、精神健康の悪化や自殺の増加、生活習慣病の増加、学力の低下、婚姻や出産への影響、経済影響などの報告事例がある。どのようなメカニズムでどのような集団にこれらのリスクが生じるのかといった基礎的理解、どのような対策によってリスクを低減できるのかといった評価を進めるとともに、多様なリスク事象を体系的に理解し、評価することが求められる。

諸対策に関する情報発信や対話によって生じる実施率上昇評価の代表的な例として、ワクチン接種に関するナッジメッセージの事例がある²¹⁾。物理的距離の確保についての評価事例もある²²⁾。長期的に効果が継続し、心理的負担などをもたらず、個人やサブ集団、コミュニティの特性に応じたメッセージ開発や協働活動の実践と効果評価を進めることが重要である。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

① 室内環境における感染リスクの予測

空調・換気による感染性エアロゾルの対策は、基本的に在室者への感染リスクを下げることである。その効果をより明らかにするには、在室者の病原体の被曝量を評価する必要があるが、現状は感染リスクに関して様々な数理モデルが提案されている段階である。都市スケールでは、SEIR (Susceptible, Exposed, Infectious, Recovered) モデルが用いられているが、これには感染のメカニズムが含まれていない。建物スケールレベルでは、区画したSEIRモデル、エージェントモデル、Wells-Rileyモデルが用いられている。この中で、感染リスクと換気量の関係を明確に表しているのはWells-Rileyモデルである。Wells-Rileyの改良モデルや室内環境中での経気道曝露を予測する*in silico*モデルなどに関する研究が行われている。

② 感染と換気量の関係

感染と換気量の関係について、中国での3人以上のクラスター318事例を解析した結果、密閉された換気の悪い空間での感染はエアロゾルが原因であると指摘している²³⁾。環境中のSARS-CoV-2の実態や集団感染事例に関する報告は多くみられるが、集団感染が起きた時の換気量に関する調査報告は僅かである。レストランの集団感染時の調査報告では、換気量が $3.24 \text{ m}^3 / (\text{h} \cdot \text{人})$ と極端に少なく、感染者が出たエリアは空気が循環していただけだったことが集団感染につながったと指摘されている¹¹⁾。この換気量は厚生労働省とWHOが推奨している換気量の1/10程度である。厚生労働省は、必要換気量について一人あたり毎時 30 m^3 を満たせば、「換気が悪い空間」には当てはまらないとしており、WHOは検疫施設を含む医療環境での一人あたり毎時の必要換気量を 216 m^3 (または換気回数6回/h)、非医療施設では 36 m^3 としている²⁴⁾。

③ 補助設備としてのポータブル式空気清浄機の活用

補助設備としての空気清浄機は局所の空気浄化に有効である。感染リスクの低減策として、とくに十分な換気量が得られない居室において、対象室容積に応じた風量で、HEPAフィルター (High Efficiency Particulate Air Filter、高性能フィルター) やMERV13またはMERV14 (Minimum Efficiency Reporting Value、最小捕集率報告値) フィルター付きの空気清浄機の活用が薦められている。実環境における空気清浄機によるエアロゾルの低減効果に関する研究成果が発表されている²⁵⁾。

④ UVGIの活用

ウイルスに対するUVGI (Ultraviolet Germicidal Irradiation、紫外線照射による殺菌) の有効性から、WHO(2009)²⁶⁾、CDC(2019)²⁷⁾、REHVA(2020)、ASHRAE(2020)、空気調和・衛生工学会(2020)などはその適応を推奨している。UV装置にはUVランプかUV-LEDデバイスがある。部屋の上部にUV装置を設置するアップルーム方式、空調機内またはダクト内といった空調システム内に設置するインダクト方式がある。この2年で、UV-CによるSARS-CoV-2の不活効果に関する研究成果が多く発表されている²⁸⁾。日本企業が波長の222 nmのUV-C装置を開発し、製品販売に至っている。

⑤ 下水疫学

下水処理場に流入した下水中の違法薬物や病原性微生物の分析を通じて、対象地域の薬物使用状況や感染状況を把握するアプローチはCOVID-19流行以前からあった。COVID-19の流行以降、①個人情報に伴わない、②単発の測定で流域全体の情報を把握できる、③代表性のある情報が得られる (人への検査の多寡に依存しない)、④早期検知が可能である、などの利点が着目され、下水疫学の技術開発が進んできた。COVID-19の全数把握が難しくなった地域では、感染者状況の経時変化を知るうえで最も有用なモニタリング手法の一つは下水疫学であるとの認識が示されている²⁹⁾。このようなモニタリング手法は、全数把握が困難となった状況下において、特に重要となるであろう。さらに変異株の測定、メタゲノム解析による多様かつ新規の病原性微生物の把握も可能となっている。施設単位で排出される下水を調査することで、対象施設内の居住者の感染を事前に検知し、感染対策につなげられる。

⑥ 感染対策実施率の測定

COVID-19の対策制御の実効性を評価するためのアプローチとして、人工知能と画像撮影によるマスク着用率や人と人との間の平均距離の測定、CO₂センサーを用いた換気率の測定、マイクロホンアレイを用いた会話発生頻度や声の大きさの測定、風速計を用いた気流の解析などがある。スポーツや音楽イベントなどの大規模集会、飲食店などの場を対象に社会実装されてきた。

⑦ スーパーコンピューターを用いた感染リスク評価

QMRAの精度を高めるうえで、環境中の飛沫やウイルス動態の精緻化は重要である。ウイルスを含む飛沫や飛沫核の大気中動態について、スーパーコンピューターを用いた熱・流体シミュレーションの研究が進められている¹⁹⁾。室内外でのウイルス曝露量を精度高く推定する手法として有用である。物理的距離による感染リスク低減効果を推定できるほか、マスク着用による飛沫排出量低減の観測と組み合わせることで、マスク着用による感染リスク低減効果を推定できるなど、対策効果の評価にも資すると期待される。

⑧ 人チャレンジ (human challenge)

実験状況下で人にウイルスを曝露させて感染リスクを評価したり、感染症に関する知見を得る人チャレンジはCOVID-19以前より行われてきたが、その実施の可能性や可否は倫理的観点から常に注意深く検討する必要がある。COVID-19のワクチン開発を主な目的として、イギリスでは、健康人にSARS-CoV-2を曝露させる人チャレンジが実施された³⁰⁾。この実験では、感染リスク評価において重要な基盤となる用量反応式に関する知見も含まれる。

⑨ ウイルスゲノム解析

SARS-CoV-2のゲノムを解析することで、流行している株の遺伝子変異部分が特定でき、変異株の系統樹解析や、変異部位から感染の伝搬への影響を推測できる。小集団に適用すると誰から誰に感染が生じたか推定できる。現在では、国際的なデータベースの実装も進み、登録されたSARS-CoV-2のゲノムデータから時空間的な分布とともに解析して、変異株などがどのような地域から世界に拡散したか、あるいは対象地域へと持ち込まれたか、変異株の発生による感染者数の増加の予測といった評価が進められている。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

■国内

- JST CREST : [コロナ基盤] 異分野融合による新型コロナウイルスをはじめとした感染症との共生に資する技術基盤の創生 (2020～2023年度、1課題につき上限1.5億円程度)

文部科学省の選定した戦略目標「[総合知]で築くポストコロナ社会の技術基盤」のもと、2020年度に発足した。COVID-19をはじめとする感染症との共生に資する技術基盤の早期構築を目指している。

- JST さきがけ : [パンデミック社会基盤] パンデミックに対してレジリエントな社会・技術基盤の構築 (2021～2025年度、1課題につき上限3～4千万円程度)

文部科学省の戦略目標「[総合知]で築くポストコロナ社会の技術基盤」のもと、2021年度に発足した。COVID-19対応に関する社会的・技術的課題について、適切な対策と多様な人々の共生を可能とする持続可能な社会に向けた基盤の構築を目指す。2021年度に12課題、2022年度に9課題が採択されている。

(5) 科学技術的課題

① 解析室内環境における感染リスク予測の不確実性

現状では、COVID-19は多彩な感染経路(飛沫感染、エアロゾル感染、接触感染)を有することが分かっているが、それぞれの感染経路の寄与度についてまだわからないことが多い。感染経路別のリスクはケースによって異なっている。現在室内の気流における数値解析とエアロゾルの呼吸器系への沈着を連成したモデルが検討されているが、被曝者の呼吸系への沈着に深く関係する環境中のSARS-CoV-2の粒径分布は、測定者によってさまざまである³¹⁾。放出されたSARS-CoV-2の環境中での活性特性に関する情報が著しく不足しており、実環境で感染リスクを予測するには課題が多く存在している。

② SARS-CoV-2の用量反応式

SARS-CoV-2の用量反応式の構築はQMRAでの基盤となるものであり、特に変異株の特性や上気道や下気道といった部位に応じた精緻な用量反応式の確立は重要な課題となっている。

③ 飛沫・飛沫核のウイルス粒径分布

COVID-19感染者から排出される飛沫や飛沫核の粒径分布ごとのウイルス量およびその感染価については不明な点が多い。これらは環境中のウイルス動態の理解やQMRAの実施のうえで不可欠である。

④ 空間中のエアロゾルの挙動

排出されたエアロゾルは、水分の蒸散によって粒径が変化するとともに、落下速度が遅いため、わずかな気流によっても、室内を移動する、CFD（数値流体力学）モデルによって、その挙動や換気や空気清浄機の対策効果のシミュレーションが試みられているが、その理解はQMRAの実施にも重要である³²⁾。

⑤ 鼻腔及び唾液中の感染性ウイルス濃度

感染に寄与するのは感染性ウイルスのみであるが、RT-PCRで容易に測定できる遺伝子量と異なり測定が難しい。感染からの日数によって大きく変化し、人によってばらつきも非常に大きい、感染リスクの推定には、部位別の値や、濃度のばらつきの分布などの除法が不可欠である。

⑥ 病原体毎の感染経路

従来腸に感染すると考えられていたノロウイルスが、唾液線を通じて感染することを示唆する結果³³⁾が得られており、病原体毎の感染経路の正しい理解が、QMRAの実施には重要である。

⑦ 感染伝播を抑制するための必要換気量の検討

換気量の確保と気流制御を行えば、麻疹や結核などの感染症の伝播を抑制できる十分なエビデンスはあるが、他の感染症拡散を抑制するための必要換気量を支持する十分なエビデンスはないと報告されている³⁴⁾。感染予防のための必要換気量は、感染の閾値、ウイルスの発生量と活性を知ることが前提となるが、現状では閾値についてはまだわかっていない。スーパースプレッダーからの発生量（quanta値）は普通より桁違いに多く、コンセンサスが得られたquanta値はまだなく、感染症対策のための必要換気量は決められない状況である。感染者から放出されるウイルスは、室内の換気量や気流性状によって、いわゆるクラウド（パフ）を形成することがあり、それによって室内に高濃度域が生じる。従って、換気量の他に、室内の気流計画が重要である。気流計画は、発生源がわかれば難しくないが、一般的にわからない場合が多い。このような場合に対しても適正な気流計画を与える検討が重要である。

⑧ ポータブル式空気清浄機の設置方法

厚生労働省などでは、風量5 m³/hの空気清浄機で床面積10 m²以内に1台を推奨している。これは、室内に換気がなく、空気清浄機の吹出気流の影響域を考慮したものと推察される。この基準だと100 m²の部屋には10台も設置する必要があることになる。しかし、実際の室内に気流がある場合、空気清浄機の吹出空気（ろ過後の清浄な空気）が室内の気流と混合して遠くまで届く。室内気流が空気清浄機設置の適正化に関する検討が必要である。

換気量を確認するために、CO₂センサーが用いられている。一般的にCO₂濃度が1000ppm以下であれば、一人当たり毎時の換気量は30 m³以上になる。しかし、空気清浄機は粒子状物質を除去するものであり、CO₂濃度を下げるものではない。従って、空気清浄機を用いた場合のCO₂濃度による換気量の可視化について、より明確な発信をすることが重要である。CO₂濃度は感染リスクの直接指標にならないことに注

意を要する。

9 下水疫学におけるメタゲノム解析

感染状況のモニタリングおよび早期検知のツールとして着目される下水疫学調査であるが、メタゲノム解析によって網羅的に病原性微生物を測定することが期待される。高感度なメタゲノム解析は今後の新規の感染症流行を検知するうえでのブレイクスルーを果たしうる重要な研究課題である。

10 UVGIの安全的な使用方法

紫外線による殺菌技術はほぼ確立されている。海外ではUVGIによる殺菌が病院や教室などで既に広く使われている。この2年で国内でも適用例が見られるようになった。紫外線ランプの消費電力は比較的少ないため、正しい方法で設置すれば、殺菌効果を発揮すると同時に、省エネルギーも図られる。さらに、UVGIを設置した場合、在室者の安全を考慮したUVGIの適正な設置方法に関する検討が必要である。

11 疫学研究基盤

COVID-19に関する諸対策の予防効果やリスク要因を解析するためには、疫学研究が重要な役割を担う。国外では、大規模の対象者に基づくワクチンの予防や重症化低減効果を疫学研究³⁵⁾、大規模集会などでの³⁶⁾、登録情報に基づく感染リスクの評価などの疫学研究³⁷⁾などが行われている。大規模疫学研究を進めるための基盤の整備と実施は重要な課題である。

(6) その他の課題

1 データベース整備および情報公開体制

COVID-19の流行動態を理解するためには、地域や年齢別の感染者数、重症化数、死亡者数、ウイルスゲノムデータ、ワクチン接種率など、多様なデータが必要である。精緻かつ詳細であり、迅速で利用しやすいデータベースの構築が必要である。

研究開発の推進や成果の社会実装を進めるにあたって、情報公開が十分でないことも障壁となっている。日本国内におけるCOVID-19拡大の特徴の一つに集団感染が多い。第6波と第7波では、高齢者施設と学校での集団感染が多く発生した。第6波のピークだった2022年2月14～20日の間の集団感染発生数479件、第7波の8月1～7日に587件であった。国レベルでは、クラスター対策班は多くの調査を行っているが、その集団感染発生時の環境に関する情報が十分に公開されていない。疫学調査は重要だが、集団感染が起きた時の空調・換気運用状況が分かれば、環境・設備の視点から解析でき、今後の設計・運用における集団感染対策の策定にもフィードバックできる。集団感染が起きた室内環境の空調・換気の運転データが把握できるよう、BEMS (Building Energy Management System) の普及が望ましい。海外ではビッグデータを用いた解析が既に進められており、我が国でも精力的に取り組む必要がある。

2 分野間連携

COVID-19の感染リスクや二次的影響を理解するためには、医学、工学、理学、社会科学などの多様な分野の連携が必要であるとともに、各分野の俯瞰性の高い研究リーダーの育成が重要である。

医工連携については、医学による病理的な解明、疫学調査による感染拡大や収束の解析、環境工学による感染経路の解明はそれぞれ重要である。しかし、現状ではそれらの分野間の連携が殆ど行われていない。日本だけでなく海外も同様である。集団感染に関する様々な情報、例えば、発生時の感染者の位置情報や空調・換気運転情報などを一元化したビッグデータを、医学、公衆衛生学、工学のそれぞれの視点から解析することは、今後感染症予防のための具体的な提案の策定において重要である。

③ 社会との協働

COVID-19の感染リスク制御を進めるためには、実際の現場での評価事例の蓄積が必要である。対象機関や施設において、感染リスクを評価すること自体への忌避感があったり、科学や科学者への信頼が損なわれた場合には、調査の実施がかなわないこともある。解決志向のリスク評価の深化とともに、科学の意義に関する対話、リスク制御の実践と協働が求められる。

④ リスクアセスメントの社会実装

COVID-19のリスクアセスメントを正しく社会実装するには、実際の現場での、様々な場面において、リスクアセスメントを行えることが必要である。そのための、専門能力を有する人材の育成や、誰でも簡単にリスクアセスメントを実施できるツールの作成が必要である。

⑤ 感染対策の社会的影響評価

マスク着用やステイホームなどの感染対策には、コスト以外にも、コミュニケーションの阻害や健康への影響といった側面があり、効果と悪影響を理解したうえで、必要な対策を講じることが求められる。

⑥ 環境消毒商品規制

米国では環境保護庁（EPA）の殺虫剤・殺菌剤・殺鼠剤法（FIFRA）規制の中で環境消毒製品が管理されている。定められた試験法（ASTM1053等）で一定のウイルス不活性化効果（3log10減等）が得られれば、ウイルス名やウイルス不活性化効果の表示が可能である。

日本では、医薬品以外のカテゴリーの製品（化粧品、日用品等）においては、医薬品以外の製品の広告規制から、ウイルス不活化、ウイルス名、感染の予防効果等の表示は認められていない。そのため、清掃効果と判別のつかない「ウイルス除去」以外の効果を製品に表示することは困難である。環境消毒は、新規ウイルスの感染拡大を抑えるための有効な手段であり、SARS-CoV-2では日用品にもSARS-CoV-2不活性化のエビデンスを有する製品が多く存在したが、その効果をメーカーが直接消費者に伝えることは困難であった。

FIFRAでは、「Emerging Viral Pathogen Claim」という、未知のウイルスに対しても効果を訴求できる事前警戒型の制度も有している。これは新規ウイルスのパンデミック発生時には、当該ウイルスを用いた不活性化の試験を行うことが困難であるため、より消毒剤耐性の高いと推定されるウイルスや類似のウイルスに対する効果で、一定の期間、効果の訴求を認めるという、危機対応型の枠組みである。このため、新規ウイルスであっても効果が期待できる製品リストを早急に発表することが可能になっている。

日用品を環境消毒へ使用することのメリットは非常に大きいと考えられ、今後、日用品のウイルスに対する有効性や表示等の基準の整備が必要である。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ● MARCOなどの組織的な研究拠点が形成されている。 ● 2年前と比べ、多くの論文が高いレベルの国際専門誌に発表されている。スパコン「富岳」を用いたエアロゾル拡散モデル、感染リスクの定量的評価^{19), 38), 39)}、下水からのウイルス検出技術⁴⁰⁾、環境中でのオミクロンBA.1 BA.2株の安定性の増加⁴¹⁾、ワクチン接種に関するナッジメッセージの効果²¹⁾などが報告されている。

	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●2年前と比べ、多くの論文が高いレベルの国際専門誌に発表されている。 ●UV-Cの新製品が開発され、実用化された。日用品による新型コロナウイルス不活化研究^{42), 43)} や人の行動をベースとしたレストランでのウイルス感染リスクと対策効果²⁰⁾ などが報告されている。 ●実践的な対策において、政府新型コロナウイルス感染症対策分科会、厚生労働省、東京都、公益社団法人空気調和・衛生工学会などから適時に必要な情報を発信している。
米国	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ●継続的、積極的に多くの基礎研究成果が高いレベルの国際専門誌に発表されている。 ●CFD (数値流体力学) モデルを用いた、室内での飛沫の拡散挙動と、空気清浄機の除去効果のシミュレーション³²⁾、感染者と濃厚接触した非感染者の、鼻腔及び唾液の感染性ウイルス量の経時変化測定⁴⁴⁾、環境表面に由来する感染ルートに関する総説⁴⁵⁾、環境から手への伝播を考慮したリスクシミュレーション⁴⁶⁾、市中での高頻度接触表面の汚染モニタリング⁴⁷⁾、コミュニティ内の啓発活動によるマスク着用率の上昇と感染率低下¹⁷⁾、COVID-19全数把握が難しくなった地域での下水疫学モニタリングの有用性²⁹⁾ など、実際の感染対策に対しても有意義な基礎研究成果を創出している。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ●ASHRAEが2020年4月14日に「ASHRAE Position Document on Infectious Aerosols」、CDCが2021年5月7日に「Scientific Brief: SARS-CoV-2 Transmission」をそれぞれ公表したが、更新されていない。 ●空間中のウイルスの除去・不活化効果を測定するための室内空間をモデルとした試験方法の開発と各種空間ウイルス不活化法の評価⁴⁸⁾、天井埋込型UV殺菌空気清浄機の効果⁴⁹⁾、室内空間での空気清浄機の感染リスク低減効果の実験的検証⁵⁰⁾、UVCによるエアロゾル中コロナウイルス不活化効果などが報告されている。
欧州	基礎研究	○	→	<p>【EU】欧州各国から、継続的、積極的に多くの基礎研究成果が高いレベルの国際専門誌に発表されている。</p> <p>【英国】環境表面の汚染データに基づく感染リスクアセスメントと対策効果の推定⁷⁾、SARS-CoV-2の人への接種試験による感染成立量の推定³⁰⁾ が報告されている。</p> <p>【ポルトガル】SARS-CoV-2消毒手法のシステムティックレビュー⁵¹⁾</p> <p>【ベルギー】下水中SARS-CoV-2ウイルス調査に影響を及ぼす因子⁵²⁾ が報告されている。</p> <p>【スウェーデン】COVID-19が子供の健康に与えた影響⁵³⁾ が報告されている。</p>
	応用研究・開発	○	→	<p>【EU】REHVAは2021年4月15日に「How to operate HVAC and other building service systems to prevent the spread of the coronavirus (SARS-CoV-2) disease (COVID-19) in workplaces」を公表したが、その後更新されていない。</p> <p>【イタリア】UV-Cの非常に高い新型コロナ不活化効果⁵⁴⁾ を報告</p>
中国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●この2～3年で著しい研究成果を発表しており、COVID-19に関して多くの基礎研究論文が高いレベルの国際専門誌に掲載されている。 ●クラスターが発生したレストランでの気流解析による感染リスクアセスメント¹¹⁾、オミクロン株の環境中での安定性の増加⁵⁵⁾、輸入冷凍食品に由来するクラスター発生事例のレビュー⁵⁶⁾、飛沫の挙動と公共交通機関での感染レビュー⁵⁷⁾、廃棄物からの感染リスクのレビュー⁵⁸⁾ など実際の感染対策に対して有意義な基礎研究成果を創出している。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●応用研究も積極的に行われている。高いレベルの国際専門誌に多くの論文が発表されている。CFD (数値流体力学) モデルを用いた、室内での飛沫の拡散挙動と、空気清浄機の除去効果のシミュレーション⁵⁹⁾ などの報告がなされている。 ●空気清浄機による微生物の除去効果に関するISO規格の制定に主導な役割を果たすなど積極的に取り組んでいる。
韓国	基礎研究	-	-	最新の研究動向が不明瞭であるため評価を避ける
	応用研究・開発	-	-	最新の研究動向が不明瞭であるため評価を避ける

その他の国・地域 (任意)	基礎研究	-	-	【メキシコ】 下水からのコロナウイルスの検出方法のレビューとメキシコでの結果が報告されている。 ⁶⁰⁾ 【イスラエル】 下水や埋め立て浸出液からの SARS-CoV-2 や他ウイルスの検出のレビューがなされている。 ⁶¹⁾ 【カナダ】 ウイルス感染に対する湿度の影響に関するシステムティックレビューがなされている。 ⁶²⁾ 【イラン】 パンデミック中の地下鉄でのフィジカルディスタンス確保に対するナッジの効果が報告されている。 ²²⁾
---------------	------	---	---	--

(註1)「フェーズ」

「基礎研究」：大学・国研などでの基礎研究レベル。

「応用研究・開発」：技術開発（プロトタイプの開発含む）・量産技術のレベル。

(註2)「現状」 ※我が国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価。

◎：他国に比べて特に顕著な活動・成果が見えている ○：ある程度の顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3)「トレンド」

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

- ・ 社会－生態システムの評価・予測（環境・エネ分野 2.8.1）
- ・ 都市環境サステナビリティ（環境・エネ分野 2.8.3）
- ・ 水利用・水処理（環境・エネ分野 2.9.1）
- ・ 環境分析・化学物質リスク評価（環境・エネ分野 2.10.2）
- ・ 感染症（ライフ・臨床医学分野 2.1.9）

参考・引用文献

- 1) Adam M. Finkel, ““Solution-Focused Risk Assessment”: A Proposal for the Fusion of Environmental Analysis and Action,” *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal* 17, no. 4 (2011) : 754-787., <https://doi.org/10.1080/10807039.2011.588142>.
- 2) Motoya Hayashi, et al., “Measures against COVID-19 concerning Summer Indoor Environment in Japan,” *Japan Architectural Review* 3, no. 4 (2020) : 423-434., <https://doi.org/10.1002/2475-8876.12183>.
- 3) Takashi Kurabuchi, et al., “Operation of air-conditioning and sanitary equipment for SARS-CoV-2 infectious disease control,” *Japan Architectural Review* 4, no. 4 (2021) : 608-620., <https://doi.org/10.1002/2475-8876.12238>.
- 4) Neeltje van Doremalen, et al., “Aerosol and Surface Stability of SARS-CoV-2 as Compared with SARS-CoV-1,” *New England Journal of Medicine* 382, no. 16 (2020) : 1564-1567., <https://doi.org/10.1056/NEJMc2004973>.
- 5) 横畑綾治, 他 「接触感染経路のリスク制御に向けた新型ウイルス除染機序の科学的基盤：コロナウイルス、インフルエンザウイルスを不活性化する化学物質群のシステムティックレビュー」『リスク学研究』 30 巻 1号 (2020) : 5-28., https://doi.org/10.11447/jjra.30.1_5.
- 6) Emanuel Goldman, “Exaggerated risk of transmission of COVID-19 by fomites,” *Lancet Infectious Disease* 20, no. 8 (2020) : 892-893., [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(20\)30561-2](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(20)30561-2).
- 7) Ana K. Pitol and Timothy R. Julian, “Community Transmission of SARS-CoV-2 by Surfaces:

- Risks and Risk Reduction Strategies,” *Environmental Science & Technology Letters* 8, no. 3 (2021) : 263-269., <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.0c0096>.
- 8) Centers of Disease Control and Prevention (CDC), “Science Brief: SARS-CoV-2 and Surface (Fomite) Transmission for Indoor Community Environments,” <https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/more/science-and-research/surface-transmission.html#print>, (2023年2月1日アクセス) .
- 9) William C. Hinds, *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*, 1st ed., (Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 1999), 37.
- 10) Slovenian Institute for Standardization (SIST), “CEN/TS 16976 : 2017. Ambient air - Determination of the particle number concentration of atmospheric aerosol,” iTeh, Inc., <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/b15f7b8e-0930-4ccd-9e34-474a15c4b069/sist-ts-cen-ts-16976-2017>, (2023年2月1日アクセス) .
- 11) Yuguang Li, et al., “Probable airborne transmission of SARS-CoV-2 in a poorly ventilated restaurant,” *Building and Environment* 196 (2021) : 107788., <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107788>.
- 12) Shelly L. Miller, et al., “Transmission of SARS-CoV-2 by inhalation of respiratory aerosol in the Skagit Valley Chorale superspreading event,” *Indoor Air* 31, no. 2 (2021) : 314-323., <https://doi.org/10.1111/ina.12751>.
- 13) Lidia Morawska and Junji Cao, “Airborne transmission of SARS-CoV-2: The world should face the reality,” *Environment International* 139 (2020) : 105730., <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105730>.
- 14) World Health Organization (WHO), “Coronavirus disease (COVID-19) : How is it transmitted?” <https://www.who.int/news-room/questions-and-answers/item/coronavirus-disease-covid-19-how-is-it-transmitted>, (2023年2月1日アクセス) .
- 15) 国立感染症研究所 (NIID)「新型コロナウイルス (SARS-CoV-2) の感染経路について (2022年3月28日)」 <https://www.niid.go.jp/niid/ja/2019-ncov/2484-idsc/11053-Covid19-78.html>, (2023年2月1日アクセス) .
- 16) 内閣官房 新型コロナウイルス感染症対策分科会「第7波に向けた緊急提言 (令和4年7月14日 (木))」内閣官房, https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/ful/taisakuisin/bunkakai/dai17/7thwave_teigen.pdf, (2023年2月1日アクセス) .
- 17) Jason Abaluck, et al., “Impact of community masking on COVID-19: A cluster-randomized trial in Bangladesh,” *Science* 375, no. 6577 (2022) : eabi9069., <https://doi.org/10.1126/science.abi9069>.
- 18) Boris Revollo, et al., “Same-day SARS-CoV-2 antigen test screening in an indoor mass-gathering live music event: a randomised controlled trial,” *Lancet Infectious Disease* 21, no. 10 (2021) : 1365-1372., [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(21\)00268-1](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(21)00268-1).
- 19) Rahul Bale, et al., “Quantifying the COVID19 infection risk due to droplet/aerosol inhalation,” *Scientific Reports* 12 (2022) : 11186., <https://doi.org/10.1038/s41598-022-14862-y>.
- 20) Tianyi Jin, et al., “Interventions to prevent surface transmission of an infectious virus based on real human touch behavior: a case study of the norovirus,” *International Journal of Infectious Disease* 122 (2022) : 83-92., <https://doi.org/10.1016/j.ijid.2022.05.047>.
- 21) Shusaku Sasaki, Tomoya Saito and Fumio Ohtake, “Nudges for COVID-19 voluntary

- vaccination: How to explain peer information?” *Social Science & Medicine* 292 (2022) : 114561., <https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2021.114561>.
- 22) Ramin Shiraly, et al., “Nudging physical distancing behaviors during the pandemic: a field experiment on passengers in the subway stations of shiraz, Iran,” *BMC Public Health* 22 (2022) : 702., <https://doi.org/10.1186/s12889-022-13184-y>.
- 23) Hua Qian, et al., “Indoor transmission of SARS-CoV-2,” *Indoor Air* 31, no. 3 (2021) : 639-645., <https://doi.org/10.1111/ina.12766>.
- 24) World Health Organization (WHO), “Roadmap to improve and ensure good indoor ventilation in the context of COVID-19,” <https://www.who.int/publications/i/item/9789240021280>, (2023年2月1日アクセス) .
- 25) Bert Blocken, et al., “Ventilation and air cleaning to limit aerosol particle concentrations in a gym during the COVID-19 pandemic,” *Building and Environment* 193 (2021) : 107659., <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107659>.
- 26) World Health Organization (WHO), “Natural Ventilation for Infection Control in Health-Care Settings: WHO guidelines 2009,” <https://www.who.int/publications/i/item/9789241547857>, (2023年2月1日アクセス) .
- 27) Centers of Disease Control and Prevention (CDC), “Guidelines for Environmental Infection Control in Health-Care Facilities, 2003, Updated: July 2019,” <https://www.cdc.gov/infectioncontrol/pdf/guidelines/environmental-guidelines-P.pdf>, (2023年2月1日アクセス) .
- 28) Natalia Wiktorczyk-Kapischke, et al., “SARS-CoV-2 in the environment—Non-droplet spreading routes,” *Science of The Total Environment* 770 (2021) : 145260., <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145260>.
- 29) Natalie Dean, “Tracking COVID-19 infections: time for change,” *Nature* 602, no. 7896 (2022): 185., <https://doi.org/10.1038/d41586-022-00336-8>.
- 30) Ben Killingley, et al., “Safety, tolerability and viral kinetics during SARS-CoV-2 human challenge in young adults,” *Nature Medicine* 28, no. 5 (2022) : 1031-1041., <https://doi.org/10.1038/s41591-022-01780-9>.
- 31) Jialei Shen, et al., “Airborne transmission of SARS-CoV-2 in indoor environments: A comprehensive review,” *Science and Technology for the Built Environment* 27, no. 10 (2021) : 1331-1367., <https://doi.org/10.1080/23744731.2021.1977693>.
- 32) John E. Castellini Jr., et al., “Assessing the use of portable air cleaners for reducing exposure to airborne diseases in a conference room with thermal stratification,” *Building and Environment* 207, Part B (2022) : 108441., <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108441>.
- 33) S. Ghosh, et al., “Enteric viruses replicate in salivary glands and infect through saliva,” *Nature* 607, no. 7918 (2022) : 345-350., <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04895-8>.
- 34) Yuguo Li, et al., “Role of ventilation in airborne transmission of infectious agents in the built environment - a multidisciplinary systematic review,” *Indoor Air* 17, no. 1 (2007) : 2-18., <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2006.00445.x>.
- 35) UK Health Security Agency, “Research and analysis: COVID-19 vaccine monthly surveillance reports,” GOV.UK, <https://www.gov.uk/government/publications/covid-19-vaccine-weekly-surveillance-reports>, (2023年2月1日アクセス) .
- 36) Department for Digital, Culture, Media & Sport, Department for Business, Energy & Industrial Strategy and Department of Health and Social Care, “Notice: Information on the

- Events Research Programme,” GOV.UK, <https://www.gov.uk/government/publications/information-on-the-events-research-programme>, (2023年2月1日アクセス) .
- 37) Clara Suñer, et al., “Association between two mass-gathering outdoor events and incidence of SARS-CoV-2 infections during the fifth wave of COVID-19 in north-east Spain: A population-based control-matched analysis,” *The Lancet Regional Health - Europa* 15 (2022): 100337., <https://doi.org/10.1016/j.lanepe.2022.100337>.
- 38) Keiji Onishi, et al., “Numerical analysis of the efficiency of face masks for preventing droplet airborne infections,” *Physics of Fluids* 34, no. 3 (2022) : 033309., <http://doi.org/10.1063/5.0083250>.
- 39) 坪倉誠「スパコン「富岳」を用いた室内環境におけるウイルス飛沫・エアロゾル感染リスクとリスク低減対策の定量評価」『ファルマシア』58巻5号(2022):435-439., https://doi.org/10.14894/faruawpsj.58.5_435.
- 40) 吉田弘「下水中のポリオウイルスと新型コロナウイルス検査」『Yakugaku Zasshi』142巻1号(2022):11-15., <https://doi.org/10.1248/yakushi.21-00161-1>.
- 41) Ryohei Hirose, et al., “Differences in environmental stability among SARS-CoV-2 variants of concern: both omicron BA.1 and BA.2 have higher stability,” *Clinical Microbiology and Infection* 28, no. 11 (2022) : 1486-1491., <https://doi.org/10.1016/j.cmi.2022.05.020>.
- 42) 山本哲司, 他「市販エタノール消毒剤のSARS-CoV-2を含む複数の微生物に対する消毒効果」『リスク学研究』32巻2号(2023):165-169., <https://doi.org/10.11447/jjra.O-22-012>.
- 43) 増川克典, 他「手指消毒による感染リスク低減とQOL向上の両立: 塩化ベンザルコニウムとエタノールの組合せによるウイルス不活化効果」『リスク学研究』32巻1号(2022):57-64., <https://doi.org/10.11447/jjra.SRA-0420>.
- 44) Emily S. Savelle, et al., “Quantitative SARS-CoV-2 Viral-Load Curves in Paired Saliva Samples and Nasal Swabs Inform Appropriate Respiratory Sampling Site and Analytical Test Sensitivity Required for Earliest Viral Detection,” *Journal of Clinical Microbiology* 60, no. 2 (2022) : e0178521., <https://doi.org/10.1128/jcm.01785-21>.
- 45) Peter Katona, Ravina Kullar and Kevin Zhang, “Bringing Transmission of Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2 (SARS-CoV-2) to the Surface: Is There a Role for Fomites?” *Clinical Infectious Disease* 75, no. 5 (2022) : 910-916., <https://doi.org/10.1093/cid/ciac157>.
- 46) Amanda M. Wilson, et al., “Modeling COVID-19 infection risks for a single hand-to-fomite scenario and potential risk reductions offered by surface disinfection,” *American Journal of Infection Control* 49, no. 6 (2021) : 846-848., <https://doi.org/10.1016/j.ajic.2020.11.013>.
- 47) Abigail P. Harvey, et al., “Longitudinal Monitoring of SARS-CoV-2 RNA on High-Touch Surfaces in a Community Setting,” *Environmental Science & Technology Letters* 8, no. 2 (2021) : 168-175., <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.0c00875>.
- 48) U.S. Environmental Protection Agency (EPA), “Results for Aerosol Treatment Technology Evaluation with Grignard Pure, July 19, 2021 Report,” <https://www.epa.gov/covid19-research/results-aerosol-treatment-technology-evaluation-grignard-pure>, (2023年2月1日アクセス) .
- 49) Linda D. Lee, et al., “Evaluation of multiple fixed in-room air cleaners with ultraviolet germicidal irradiation, in high-occupancy areas of selected commercial indoor environments,” *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* 19, no. 1 (2022) : 67-77.,

<https://doi.org/10.1080/15459624.2021.1991581>.

- 50) Brett C. Singer, et al., “Measured influence of overhead HVAC on exposure to airborne contaminants from simulated speaking in a meeting and a classroom,” *Indoor Air* 32, no. 1 (2022) : e12917., <https://doi.org/10.1111/ina.12917>.
- 51) C. P. Viana Martins, C. S. F. Xavier and L. Cobrado, “Disinfection methods against SARS-CoV-2: a systematic review,” *Journal of Hospital Infection* 119 (2022) : 84-117., <https://doi.org/10.1016/j.jhin.2021.07.014>.
- 52) Xander Bertels, et al., “Factors influencing SARS-CoV-2 RNA concentrations in wastewater up to the sampling stage: A systematic review,” *Science of The Total Environment* 820 (2022): 153290., <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153290>.
- 53) Paulina Nowicka, et al., “Explaining the complex impact of the Covid-19 pandemic on children with overweight and obesity: a comparative ecological analysis of parents’ perceptions in three countries,” *BMC Public Health* 22 (2022) : 1000., <https://doi.org/10.1186/s12889-022-13351-1>.
- 54) Mara Biasin, et al., “UV-C irradiation is highly effective in inactivating SARS-CoV-2 replication,” *Scientific Reports* 11 (2021) : 6260., <https://doi.org/10.1038/s41598-021-85425-w>.
- 55) Alex Wing Hong Chin, et al., “Increased Stability of SARS-CoV-2 Omicron Variant over Ancestral Strain,” *Emerging Infectious Disease* 28, no. 7 (2022) : 1515-1517., <https://doi.org/10.3201/eid2807.220428>.
- 56) Jiahui Wang, et al., “Perspectives: COVID-19 Outbreaks Linked to Imported Frozen Food in China: Status and Challenge,” *China CDC Weekly* 4, no. 22 (2022) : 483-487., <https://doi.org/10.46234/ccdcw2022.072>.
- 57) Qiaoqiao Wang, Jianwei Gu and Taicheng An, “The emission and dynamics of droplets from human expiratory activities and COVID-19 transmission in public transport system: A review,” *Building and Environment* 219 (2022) : 109224., <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109224>.
- 58) Jie Han, et al., “Municipal solid waste, an overlooked route of transmission for the severe acute respiratory syndrome coronavirus 2: a review,” *Environmental Chemistry Letters* (2022): 1-15., <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01512-y>.
- 59) Hui Dai and Bin Zhao, “Reducing airborne infection risk of COVID-19 by locating air cleaners at proper positions indoor: Analysis with a simple model,” *Building and Environment* 213 (2022) : 108864., <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.108864>.
- 60) Mayerlin Sandoval Herazo, et al., “A Review of the Presence of SARS-CoV-2 in Wastewater: Transmission Risks in Mexico,” *International Journal of Environmental Research and Public Health* 19, no. 14 (2022) : 8354., <https://doi.org/10.3390/ijerph19148354>.
- 61) Uttpal Anand, et al., “SARS-CoV-2 and other pathogens in municipal wastewater, landfill leachate, and solid waste: A review about virus surveillance, infectivity, and inactivation,” *Environmental Research* 203 (2022): 111839., <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111839>.
- 62) Gail M. Thornton, et al., “The impact of heating, ventilation and air conditioning (HVAC) design features on the transmission of viruses, including the 2019 novel coronavirus (COVID-19) : A systematic review of humidity,” *PLoS One* 17, no. 10 (2022) : e0275654., <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0275654>.