

すれ違いざまのウイルス空気感染リスクのピークは通過後5秒以内

呼気由来のエアロゾル粒子の流れ場を可視化、計測し、対面通過時におけるウイルス暴露リスクを検討しました。その結果、対面通過時のエアロゾル粒子数は、歩行時、ジョギング時、ランニング時、スプリント時ともに、通過後5秒以内にピークとなり、その後急速に低下することが明らかになりました。

新型コロナウイルス感染症（Covid-19）のウイルスの主な感染経路は、当初、飛沫感染と接触感染とされてきましたが、その後、エアロゾル粒子による空気感染である可能性が高いことが分かってきました。行動規制は緩和されたものの、依然として感染者は発生しており、移動時の感染予防やリスク低減が大きな課題となっています。

本研究では、移動型フルスケールマネキンと粒子追跡流速測定システムを用いて、対面通過時における呼気（噴流）由来のエアロゾル粒子の流れ場を可視化、計測し、ウイルス暴露リスクを明らかにしました。さらに、換気の有無による空力的特性の違いがウイルス暴露リスクに及ぼす影響を、比較検討しました。

その結果、換気の有無に関わらず、対面通過時のエアロゾル粒子数のピークは、歩行時、ジョギング時、ランニング時、スプリント時ともに、通過後5秒以内に発現し、その後急速に低下することが明らかになりました。また、通過速度が大きいくほど、このピークは小さくなり、これは、呼気と外気の相対速度が増大して粒子の拡散が促進されるためと考えられました。さらに、換気条件下におけるエアロゾル粒子数は、無換気条件下に比べて、顕著に少ないことが分かりました。

以上より、対面通過時のウイルス感染リスクを低下させるためには、吸気を中断する、少なくとも1m以上の物理的距離を確保する、風上の方に位置する等の対策を、対面通過後5秒以内に行うことが、特に効果的であることが示唆されました。これらの知見は、さまざまなウイルスに適用可能と考えられます。

研究代表者

筑波大学体育系

中山 雅雄 教授

浅井 武 名誉教授

研究の背景

新型コロナウイルス感染症（COVID-19）パンデミックの早い段階では、感染者が咳やくしゃみ、会話をする際に排出される、比較的大きな飛沫を通じてウイルスが感染拡大すると考えられていました。しかし、多くの空気感染の可能性が報告され、世界保健機関（WHO）は、短距離空中飛沫（short-range aerosol）と長距離空中飛沫（long-range aerosol）の2タイプの空気感染を明確に示しています。また、米国疾病対策予防センター（CDC）も、新型コロナウイルスが換気の悪い空間において、空中を浮遊するエアロゾル粒子の吸入によって空気感染を引き起こすことに、警笛を鳴らしています。

流体力学的にも、直径 $100\mu\text{m}$ 以上の飛沫は、3~5秒程度で地面に落下しますが、直径 $5\sim 100\mu\text{m}$ の大きなエアロゾル粒子は空気中に数分~数十分程度漂い、さらに、直径 $5\mu\text{m}$ 未満になると数時間漂うとされています。従って、空気中での滞留時間が長いエアロゾル粒子による感染リスクは、滞留時間が短い飛沫での感染リスクより大きいと考えられます。

空気感染の原因となるエアロゾル粒子の挙動は、空気の主流や換気の流れ場の影響を受けるために、極めて複雑で不明な点が多く、その動態とウイルス暴露リスクの関係を明らかにすることが求められています。また、最近、感染拡大の収束に伴って行動規制が緩和されたことで、人の移動や通行も活発化し、移動や運動の際に生じる人の呼気（噴流）由来のエアロゾル粒子の可視化やウイルス暴露リスクの分析・評価が喫緊の課題となっています。

そこで本研究では、移動型フルスケールマネキンと粒子追跡流速測定システム（Particle Trace Velocimetry, PTV）^{注1}を用いて、対面通過時における呼気（噴流）由来のエアロゾル粒子の流れ場を可視化、計測し、通過時におけるウイルス暴露リスクを明らかにしようとした（図1）。さらに、換気の有無による、対面通過時のエアロゾル粒子流れ場の挙動を比較検討することにより、換気の空力的特性とウイルス暴露リスクに及ぼす影響を検討しました。

研究内容と成果

本研究では、口部にエアロゾル粒子噴出装置を連結させた強化プラスチック製のフルスケール人体マネキン（高さ 1700mm ）を、電動カート（斉藤クラフト有限会社製）にセットし、噴流を伴うマネキンの対面通過運動を行いました（図2）。人体マネキンの口部から噴出されたエアロゾル粒子の可視化、計測には、レーザーシート（赤色）とハイスピードカメラで構成されるPTVシステムを用いました。人体マネキンは、約 20m の計測可能距離を直進移動し、加速、減速の影響が微小と考えられる、スタート地点から 10m の位置に計測エリアを設定しました。噴流マネキンの速度は、 5 km/h （歩行）、 10 km/h （ジョギング）、 15 km/h （ランニング）、 20 km/h （スプリント）の4条件とし、噴流量は、運動中の呼気量（分時換気量：VE）を想定した 30 l/min （歩行）、 55 l/min （ジョギング）、 80 l/min （ランニング）の3条件としました。エアロゾル粒子数は、各試技条件において5回ずつ計測し、その平均値を平均エアロゾル粒子数としました。

分析の結果、換気なし条件における、歩行速度時（ 5 km/h ）のピークエアロゾル粒子数は、全ての呼気条件において、他の速度時より大きく、対面通過後5秒以内にピークが見られ、その後、急激に減少していました（図3）。これは、エアロゾル粒子が、呼気（噴流）の主流の通過後、マネキン後方に形成された後流乱流渦の時間経過に伴う拡散が、大きな原因の一つであると考えられました。また、通過速度が大きいほど、エアロゾル粒子数は減少する傾向を示しており、通過速度の増大により噴流と外流の相対速度が増加し、拡散が促進されると推測されました。これらのことから、ウイルス暴露リスクが最も高まるのは、何れの速度においても、対面通過後5秒以内であり、また、通過速度が大きくなるほど、エアロゾル粒子の拡散が促進され、ウイルス暴露リスクは減少すると考えられました。

一方、換気あり条件では、歩行速度時（5 km/h）のピークエアロゾル粒子数は、他の移動速度の場合よりも大きくなっているものの、換気なしの場合の約 55%以下となりました。また、エアロゾル粒子数はピーク後に急激に減少し、約 50 個以下の低値に留まっていました（図 4）。これは、本実験における換気あり条件では、定常的な換気によりエアロゾル粒子が拡散されるため、ピークエアロゾル粒子数の通過速度に対する依存性は低下し、ピーク後のエアロゾル粒子数も、急激に減少すると推測されました。このことから、換気あり条件においても、ウイルス暴露リスクが最も高まるのは、対面通過後 5 秒以内であるが、通過後の暴露リスクは、換気による拡散効果により、換気なし条件よりも大幅に減少すると考えられました（図 5）。

以上のことから、歩行やジョギング等の対面通過時におけるウイルス暴露リスクは、通過後 5 秒以内にピークがあり、その後、後流の拡散により、急激にリスクは減少することが示唆されました。対面時の咳飛沫沈着量は、咳噴射口前方 60 cm、下方 30 cm が最も多く、90%以上の飛沫が前方 90 cm以内に沈着すると報告があります。従って、対面通過時には 5 秒間のリスクヘッジを考慮し、進行方向の横方向にコースを移動する、風上側を通る、吸気を中断する、相手から 1 m以上の物理的距離をおく、等により、ウイルス暴露リスクは大幅に減少すると考えられます。換気がある場合においても、屋外での大型イベント等、人が密集する場面での感染事例の報告があることから、対面通過時における 5 秒間リスクヘッジ効果は有効であり、屋外での運動時においても、同様にウイルス暴露リスクを、大幅に減少させる可能性があります。

今後の展開

本研究におけるウイルス感染リスクは、エアロゾル粒子暴露量から推測したものであり、暴露リスク評価の精度を向上させるためには、ウイルスの気中濃度や表面沈着量等を考慮した検討が必要です。また、本実験では、代表的な身体運動様式として、対面通過のみを対象としましたが、実際には、屋内外やさまざまな方向、速度の運動が行われており、換気の方法や強度を含め、多様な実験条件での計測、リスク評価が求められます。

本研究結果は、インフルエンザや風疹ウイルス等、さまざまなエアロゾル粒子が媒介する場合の感染リスク低減にも応用できると期待されます。

参考図

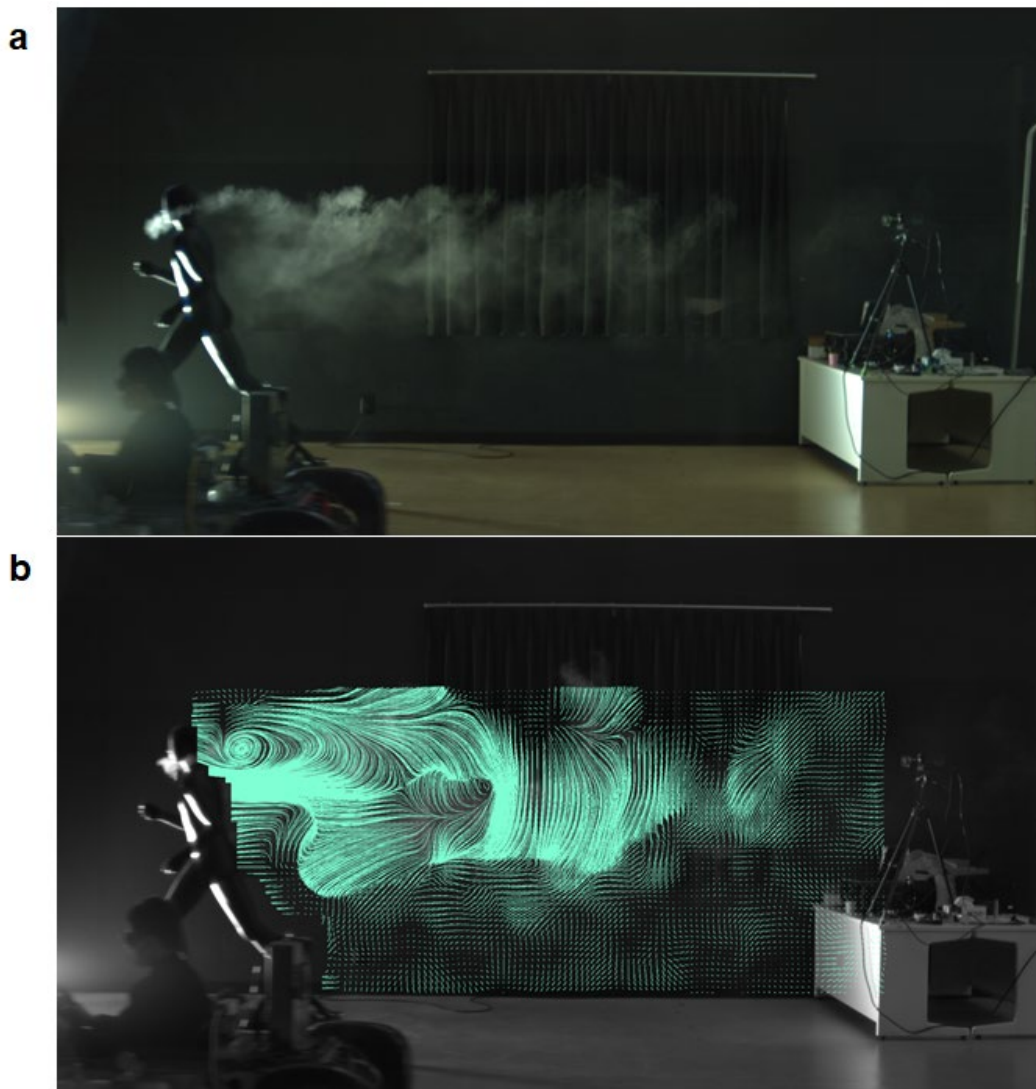


図1 移動マネキン口部から放出される呼気（エアロゾル粒子）の動態（a）と、粒子追跡流速測定システムによる大規模渦構造の流線による可視化例（b）。マネキンは画面右側から左側へ移動している。

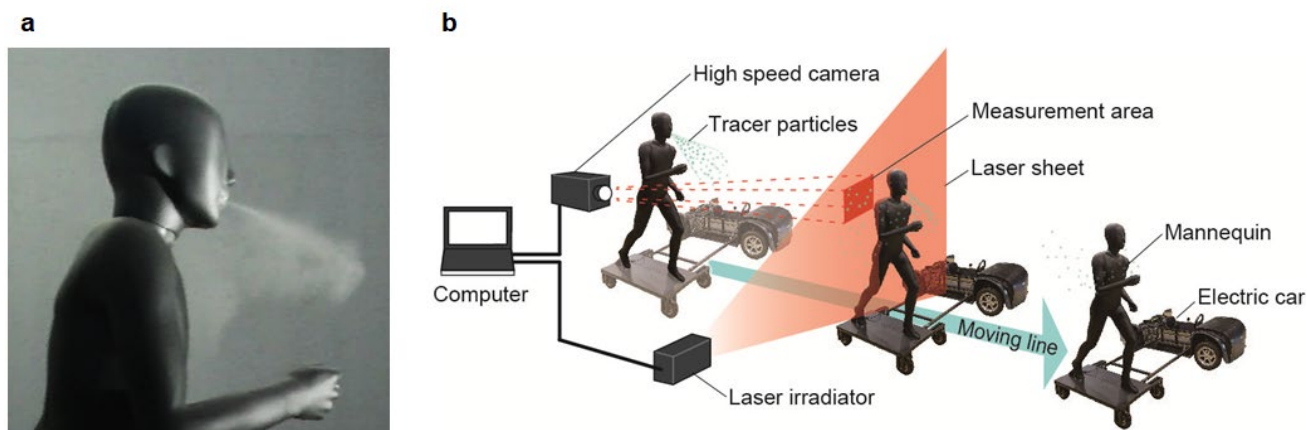


図2 口部にエアロゾル粒子噴出装置を連結させたフルスケール人体マネキン（a）と、レーザーシートをマネキンが通過する粒子追跡流速測定システムを用いた可視化実験の構成（b）。

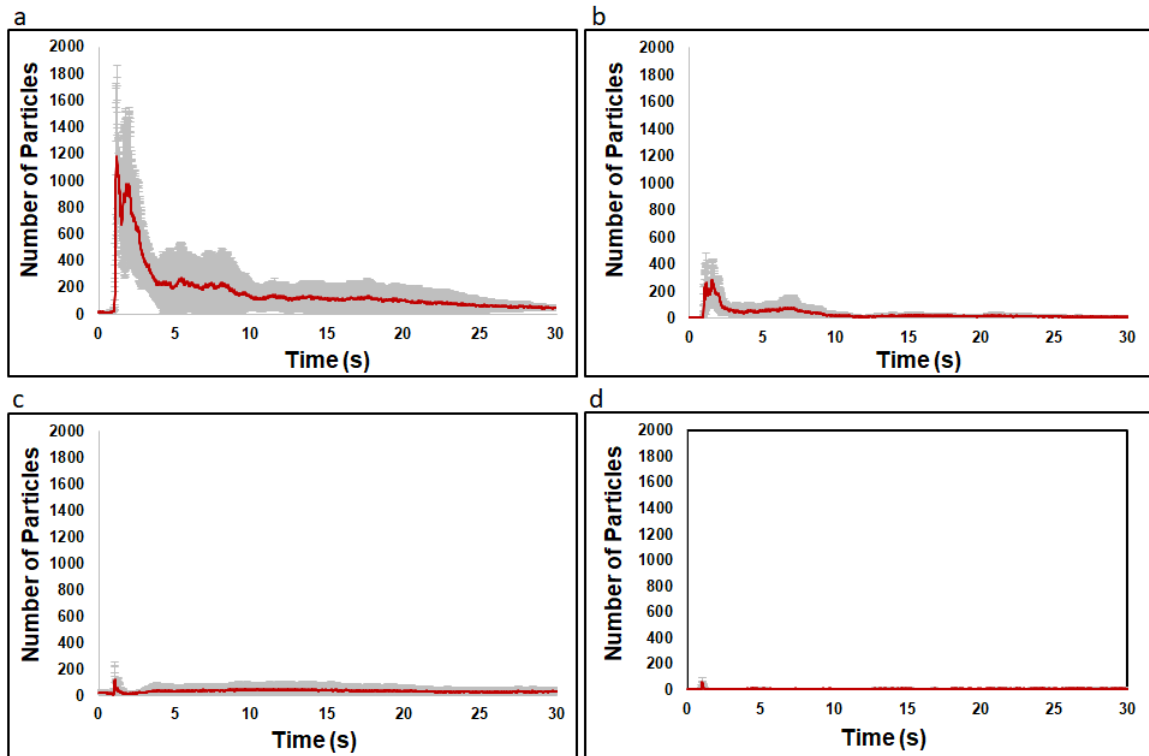


図3 無換気条件（呼気量 30L）における、通過速度 5 km/h (a)、10 km/h (b)、15 km/h (c)、20 km/h (d)における平均エアロゾル粒子数。全ての速度条件において、平均エアロゾル粒子数ピークは、対面通過後 5 秒以内に出現している。

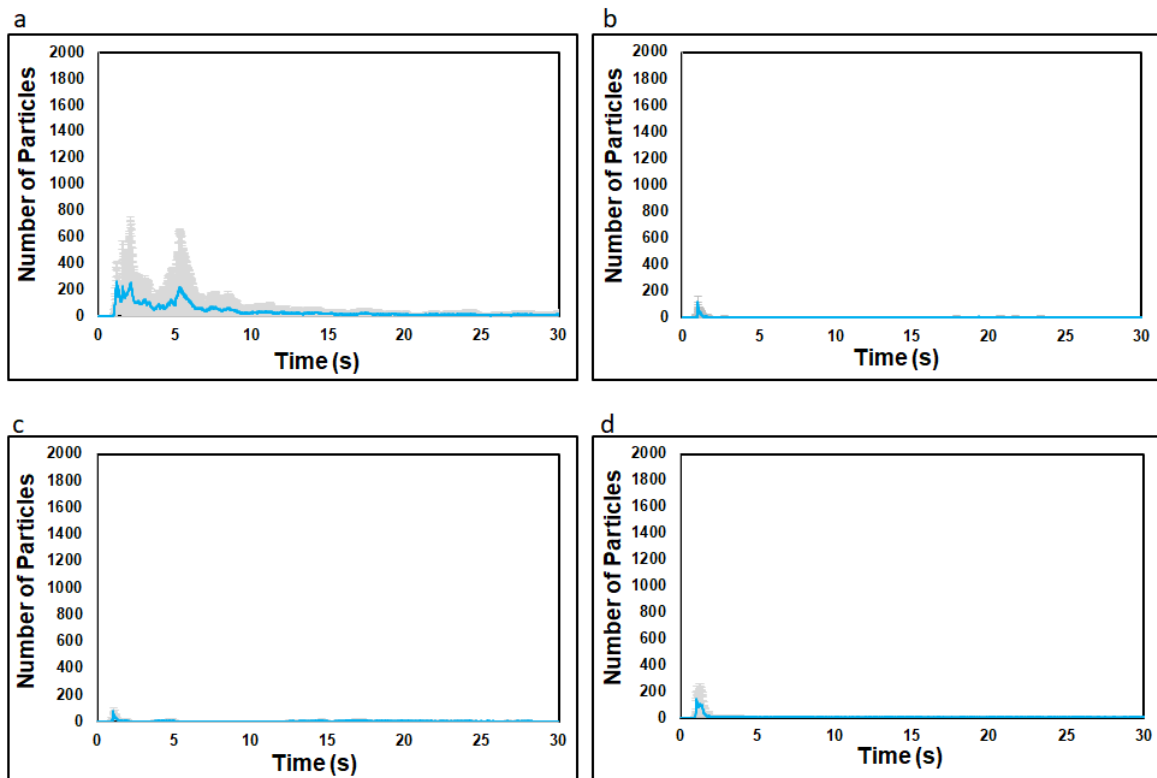


図4 換気条件（呼気量 30L）における、通過速度 5 km/h (a)、10 km/h (b)、15 km/h (c)、20 km/h (d)における平均エアロゾル粒子数。全ての速度条件において、平均エアロゾル粒子数ピークは、対面通過後 5 秒以内に出現している。

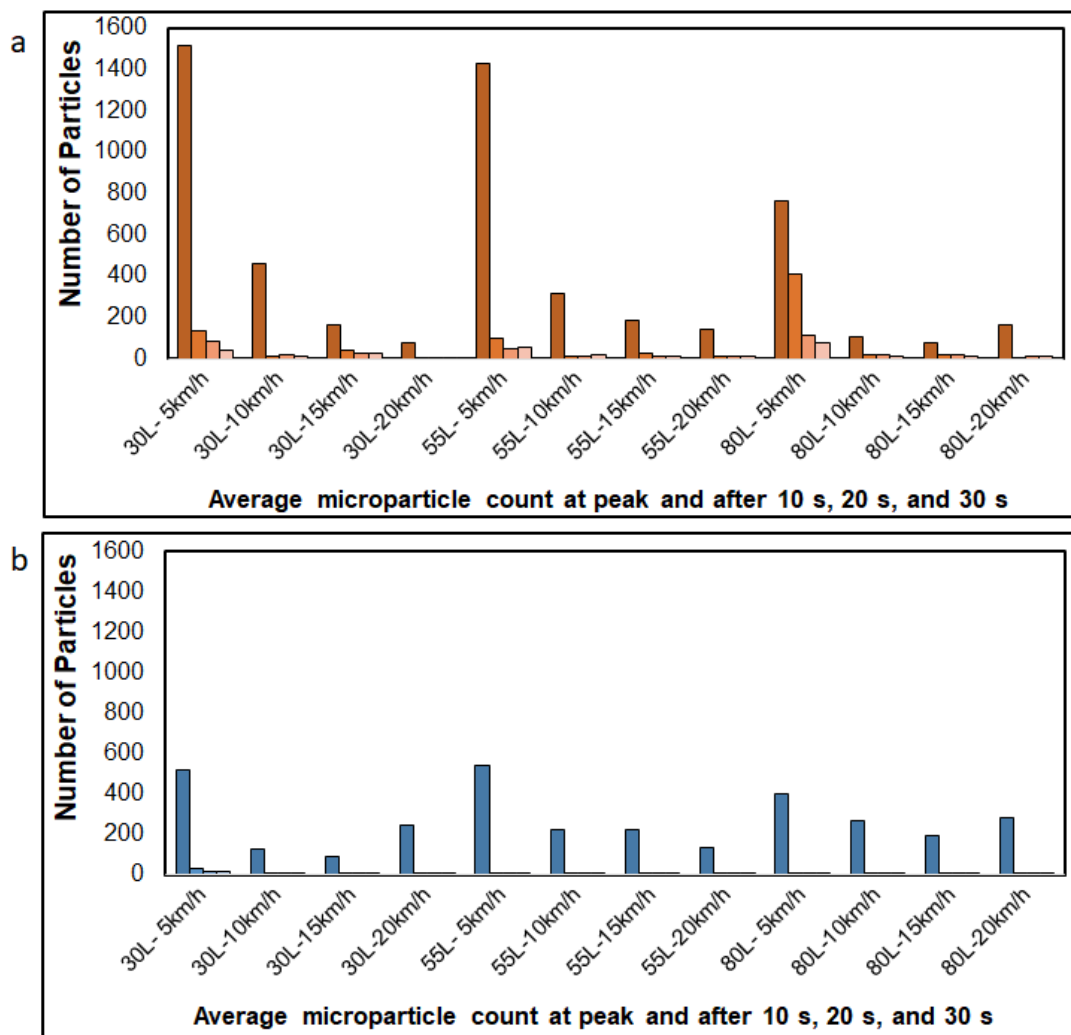


図5 換気なし (a) と換気あり条件 (b) における、通過速度 5 km/h、10 km/h、15 km/h、20 km/h の、ピーク時および 10 秒、20 秒、30 秒後の平均エアロゾル粒子数。いずれの呼気条件、速度条件においても、平均エアロゾル粒子数は時間経過に従って大幅に減少する傾向を示している。

用語解説

注1) 粒子追跡流速測定システム (Particle Trace Velocimetry, PTV)

レーザーと高速ビデオ、トレーサー粒子を用いて、粒子の位置を画像処理から追跡して計測するシステム。

研究資金

科学研究費補助金 (基盤研究 (萌芽)、JP21K19695、研究代表者: 浅井武)

掲載論文

【題名】 Peak risk of SARS-CoV-2 infection within five seconds of face-to-face encounters: an observational/retrospective study

(対面通過時における新型コロナウイルスの感染リスク: 観察的/後向き研究)

【著者名】 Takeshi Asai, Erina Kurosaki, Kaoru Kimachi, Masao Nakayama, Masaaki Koido, Sungchan Hong

【掲載誌】 *Scientific Reports*

【掲載日】 2023年10月16日

【DOI】 10.1038/s41598-023-44967-x

問合わせ先

【研究に関すること】

浅井 武（あさい たけし）

筑波大学体育系 名誉教授

URL: <https://trios.tsukuba.ac.jp/researcher/0000002044>

【取材・報道に関すること】

筑波大学広報局

TEL: 029-853-2040

E-mail: kohositu@un.tsukuba.ac.jp