

インターバルトレーニング中に 排出される飛沫・エアロゾル濃度の粒子径に よる違い

Different dynamics of expired droplets and aerosols by particle size
during interval training

渡邊裕之*, 河端将司*, 高平尚伸*

キー・ワード : COVID-19, droplets/aerosol, interval training
COVID-19, 飛沫・エアロゾル, インターバルトレーニング

【要旨】 (背景) 新型コロナウイルスによる感染拡大は、部活動やプロスポーツなど多くの競技で集団感染を発生させている。スポーツにおける感染リスクは、集団生活や競技特性による密の発生などが考えられているものの、運動負荷による影響は明らかではない。

(目的) 本研究は運動負荷時に呼気中に排出される飛沫・エアロゾルの濃度を測定することとした。

(方法) 対象は健康成人 39 名とした。飛沫・エアロゾルの計測はパーティクルカウンターを用い、10 秒間の採集を 1 試行として 24 回連続して行った。運動課題はエアロバイクを用いたインターバルトレーニングとし、運動負荷は採集開始 30 秒後 (試行 4) から 60 秒後 (試行 6) と 180 秒後 (試行 19) から 210 秒後 (試行 21) までとした。運動負荷条件下では全力ペダリングとした。運動負荷条件以外の試行では無負荷としペダリングは快適に行える回転数とした。

(結果) 粒子径 0.3~0.5 μm 未満, 0.5~1.0 μm 未満は運動負荷の有無に関係なく、全試行を通じて粒子濃度が上昇を続けた。粒子径 1.0~2.0 μm 未満, 2.0~5.0 μm 未満は運動負荷とともに濃度の上昇が見られ、運動負荷の停止とともに減少に転じた。

(結論) 粒子径 0.3~0.5 μm 未満, 0.5~1.0 μm 未満は被験者周囲に長く滞留し、粒子径 1.0~2.0 μm 未満, 2.0~5.0 μm 未満は空気抵抗や重力の影響を受け速やかに落下したものと考えられた。スポーツ時の感染予防策として飛沫対策だけでなく、エアロゾルに焦点を向けた対策も合わせて実施する必要が考えられた。

緒 言

2019 年中国武漢で始まった新型コロナウイルス (COVID-19) の蔓延は、瞬く間に世界各所に伝播し 2022 年を迎えた現在においても猛威を奮っている。新型コロナウイルスによる脅威は、有効な治療法の不在が主たる要因であるが、感染経路

が十分に解明されておらず、いつどこで感染するか分からない感染予防のための情報の欠除にある。現状では、新型コロナウイルスによる感染経路は直接・間接触感染、飛沫感染そして空気感染が懸念されている¹⁻⁴⁾。特に閉鎖空間内で人が密接している場合に呼気中に含まれる飛沫やエアロゾルを介しての感染に注意が注がれている。エアロゾルは飛沫核とも呼ばれ、WHO による定義では直径が 5 μm 以上を飛沫、5 μm 以下をエアロゾルとしている⁵⁾。粒子径の大きい飛沫は、呼気とともに排出されると同時に空気抵抗の影響を受け急速に失速し、排出から 2m 以内で地面に落下する。

* 北里大学医療衛生学部リハビリテーション学科理学療法学専攻

Corresponding author : 高平尚伸 (takahira@med.kitasato-u.ac.jp)

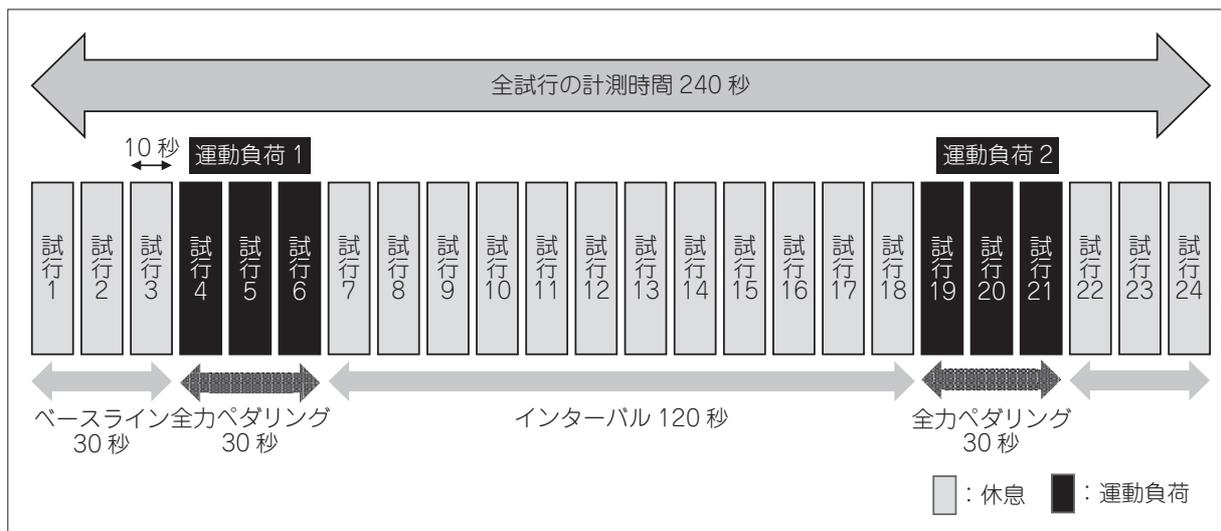


図 1 運動課題の試行手順

しかしながら、エアロゾルは空間内を浮遊し、長時間空間内に留まることが報告されていることから空気感染の原因と考えられている⁶⁻⁸⁾。

直接あるいは間接接触による感染を防ぐためには手指消毒の励行や共有する物品の消毒、防護具の着用などが有効と考えられている。一方、飛沫感染や空気感染を防止するためには、防護具の着用が有効な手段であるが、密閉率の高い N95 マスク以外のマスクやマウスカバーでは飛沫やエアロゾルの漏出や透過のリスクがあるため、呼気中に排出される飛沫やエアロゾルの動態を十分に理解する必要がある^{9,10)}。しかしながら、呼気中に排出される飛沫やエアロゾルの濃度や動態については不明なことが多い。さらにスポーツ時には呼吸が深くなると同時に頻度（呼吸回数）も増加することが考えられる。その結果、相対的に飛沫やエアロゾルの排出は増加するものと考えられるが、我々が渉猟した限り該当する研究報告は認められなかった。スポーツを安全に速やかに再開するためには、これらの基礎データの蓄積が重要である。

本研究の目的は健常成人を用いて運動負荷を加えた際の飛沫・エアロゾル濃度の変化について経時的に観察することとした。

対象および方法

対象

対象は、健常成人 39 名（男性 27 名、女性 12 名）とした。対象者の背景因子は年齢 21.38 ± 1.06 歳、身長 167.58 ± 7.63 cm、体重 61.98 ± 9.26 kg で

あった。除外基準は運動課題となるエアロバイクを用いた運動の実施が困難な者、呼吸器に障害を有する者、呼吸器の臨床症状を有する者とした。また、本研究に伴う感染リスクを軽減するため、被験者、検者ともに研究実施前の検温ならびに呼吸器症状の有無について確認・聴取した。なお、本研究は北里大学医療衛生学部研究倫理審査委員会の承認を得て実施した。（承認番号：2020-025）

測定手順

運動負荷は Power MAX V3（株式会社コナミスポーツクラブ）を使用した。測定手順は Power MAX V3 の運動負荷実施手順に準じ、最初に無酸素パワーテスト（10 秒×3 回の全力ペダリング）を行い、本実験で使用する運動負荷強度を決定した。無酸素パワーテストは体重から運動負荷強度（kilopound：kp）を決定し、ステップ 1 から 3 までの漸増負荷に設定されている。運動課題は無酸素パワーテスト後に 30 分の休息期間を経て実施し、決定された運動負荷強度（kp）にて 30 秒×2 回（ステップ 1～2）の全力ペダリングとした。

運動課題の実施手順は図 1 に示す通りである。パーティクルカウンターによる 1 回のサンプリングを 10 秒間とし、連続で 24 回（24 試行）のサンプリングを実施した。運動負荷はサンプリング 4 試行目から 6 試行目（運動負荷 1）と 19 試行目から 21 試行目（運動負荷 2）のそれぞれ 30 秒間とした。運動負荷条件以外の試行では無負荷とし、ペダリングは快適に行える回転数とした。運動課題開始後の 3 試行（1～3 試行）をベースラインとし、

1~24 試行の計測結果から減算することで一般環境下に存在する浮遊粉塵量を除外した。

飛沫・エアロゾル濃度の計測

運動課題時に排出されるエアロゾルの計測にはパーティクルカウンター（リオン株式会社：KC-52）を使用した。本機は半導体レーザーを使用した光軸交角 90 度側方錯乱方式を採用しており、粒子径 0.3 μ m 以上、0.5 μ m 以上、1.0 μ m 以上、2.0 μ m 以上、5.0 μ m 以上の 5 段階で粒子数を計測することができる。各粒子径間の粒子数については下位粒子径から上位粒子径を減算することで求めた。パーティクルカウンターの吸入流量は 2.83l/min



図 2 エアロバイクを用いた運動負荷と飛沫・エアロゾルのサンプリング

であり、本研究では粒子数を記録した後に濃度 (n/l) に換算した。

パーティクルカウンターは、飛沫・エアロゾルの発生源となる口腔が前傾姿勢により前下方を向いていることから、最も濃度が高くなる空間を想定してサドルから右前方 80cm の床に設置した。パーティクルカウンターのサンプリングプローブを Power Max V3 に向けて後方 30° 傾斜、被験者側に 20° 傾斜させた。パーティクルカウンターを固定する三脚の高さは 20cm とした (図 2)。

本研究は浮遊粉塵を除去したクリーンルームではなく一般環境下での計測となるため、着衣からの粉塵発生を制限するため被験者にはポリエステルなど合成化学繊維による衣服を着用させ、実験開始前にクリーンルーム用粘着テープを使用して衣類に付着している粉塵を除去した。また、測定中は空間内の乱流を抑制するため空調設備を停止させ、被験者ならびに検者は周期呼吸に制限を与えなかったが、発声については実験指示など最小限にとどめた。さらに測定中は被験者の呼気発生の位置を一定とさせるため Power Max V3 のハンドルを保持する姿勢を維持させた。

統計学的処理は飛沫・エアロゾル濃度の時系列変化に対するトレンド分析として一元配置分散分析を用い、Post-hoc 解析は Tukey-Kramer を用いた。なお、有意水準は 1% 未満とした。

結果

測定環境は平均室温 23.57 \pm 1.30 $^{\circ}$ C、平均湿度は 56.63 \pm 6.47% であった。無酸素パワーテストによって決定された運動負荷強度 (kp) ならびにパワー (Watt : W) を表 1 に示す。また、運動課題内で実施された運動負荷強度 (kp) とパワー (W) について表 2 に示す。運動負荷 1 に比較して運動

表 1 無酸素パワーテストの結果

	ステップ 1	ステップ 2	ステップ 3
平均負荷強度 (kp)	3.54 \pm 0.59	5.13 \pm 1.04	6.46 \pm 1.30
平均ピーク回転数 (rpm)	146.67 \pm 21.89	123.67 \pm 14.66	87.67 \pm 16.01
平均無酸素パワー (W)	434.82 \pm 121.48	515.56 \pm 148.21	462.44 \pm 126.55

平均ミドルパワートレーニング負荷強度 (kp)	3.51 \pm 0.96
-------------------------	-----------------

ステップ：無酸素パワーテスト時のステップは 1 から 3 の段階的に負荷強度を設定

ミドルパワートレーニング負荷強度：無酸素パワーテストの結果から算出されたミドルパワートレーニング用の負荷強度 (mean \pm SD)

表 2 運動課題に設定された運動負荷強度

運動負荷 1 (試行 3 ~ 5)					
平均負荷強度 (kp)		平均ピーク回転数 (rpm)		平均パワー (W)	
ステップ 1	ステップ 2	ステップ 1	ステップ 2	ステップ 1	ステップ 2
3.51 ± 0.96	3.51 ± 0.96	123.59 ± 39.11	115.36 ± 32.18	357.62 ± 129.84	322.77 ± 89.00

運動負荷 2 (試行 19 ~ 21)					
平均負荷強度 (kp)		平均ピーク回転数 (rpm)		平均パワー (W)	
ステップ 1	ステップ 2	ステップ 1	ステップ 2	ステップ 1	ステップ 2
3.51 ± 0.96	3.51 ± 0.96	101.79 ± 36.47	98.67 ± 31.94	299.05 ± 117.98	289.74 ± 90.38

ミドルパートトレーニングはステップ 1 から 2 の負荷強度を 2 段階設定
 平均ピーク回転数：各ステップのペダリング回転数
 平均パワー：各ステップの平均パワー
 (mean ± SD)

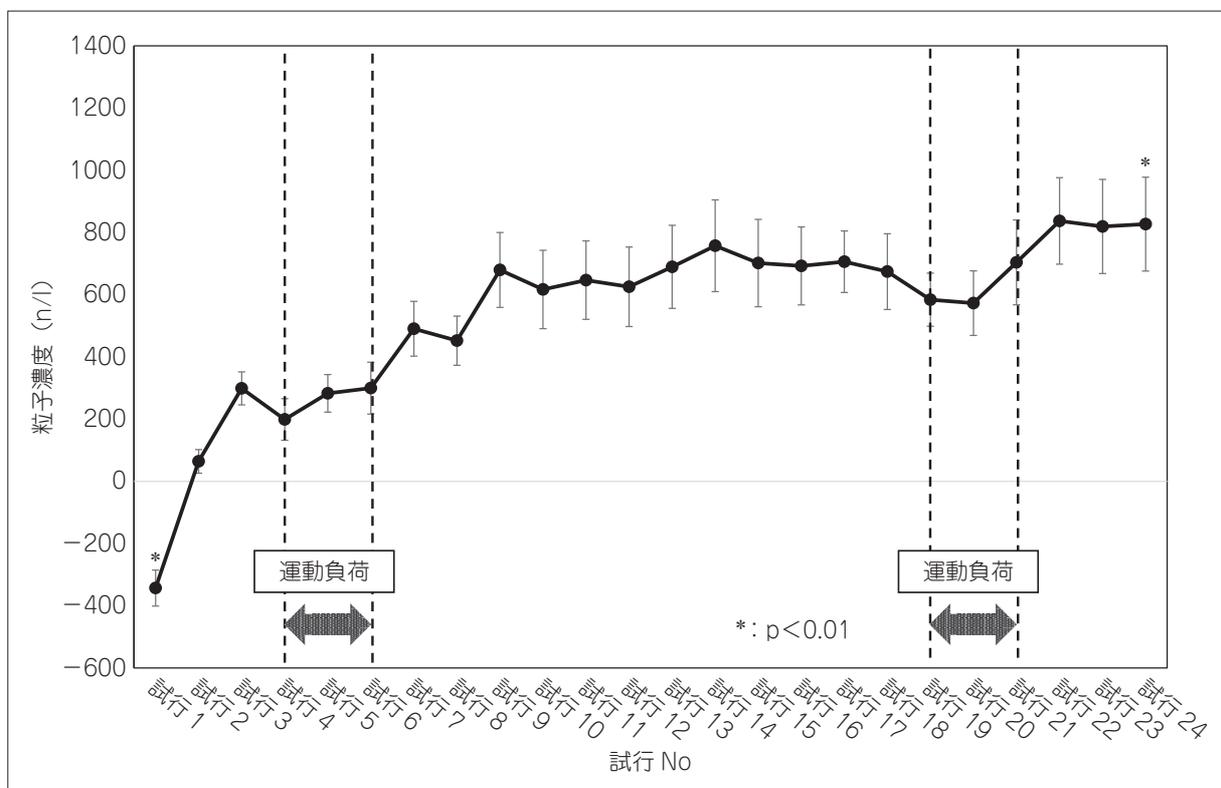


図 3 粒子径 0.3 ~ 0.5µm 未満の粒子濃度の推移
 * : 試行 1v.s. 試行 24

負荷 2 ではパワー (W) の減弱が観察された。

粒子径 0.3~0.5µm 未満の粒子濃度推移 (図 3)

最も粒子径の小さい 0.3~0.5µm 未満では課題開始とともに濃度は上昇を続けた。サンプリング 1 試行目と 24 試行目間の粒子濃度に有意差が認められた。

粒子径 0.5~1.0µm 未満の粒子濃度推移 (図 4)

粒子径 0.5~1.0µm 未満は粒子径 0.3~0.5µm 未

満と同様に課題開始とともに濃度は上昇したが、運動課題に合わせてやや濃度上昇を示す変化を認めた。サンプリング 1 試行目と 21 試行目から 23 試行目との間の粒子濃度に有意差が認められた。

粒子径 1.0~2.0µm 未満の粒子濃度推移 (図 5)

粒子径 1.0~2.0µm 未満では運動課題に合わせて粒子濃度の上昇を示すピークが認められた。サンプリング 5 試行目とサンプリング 2, 3, 11, 14~

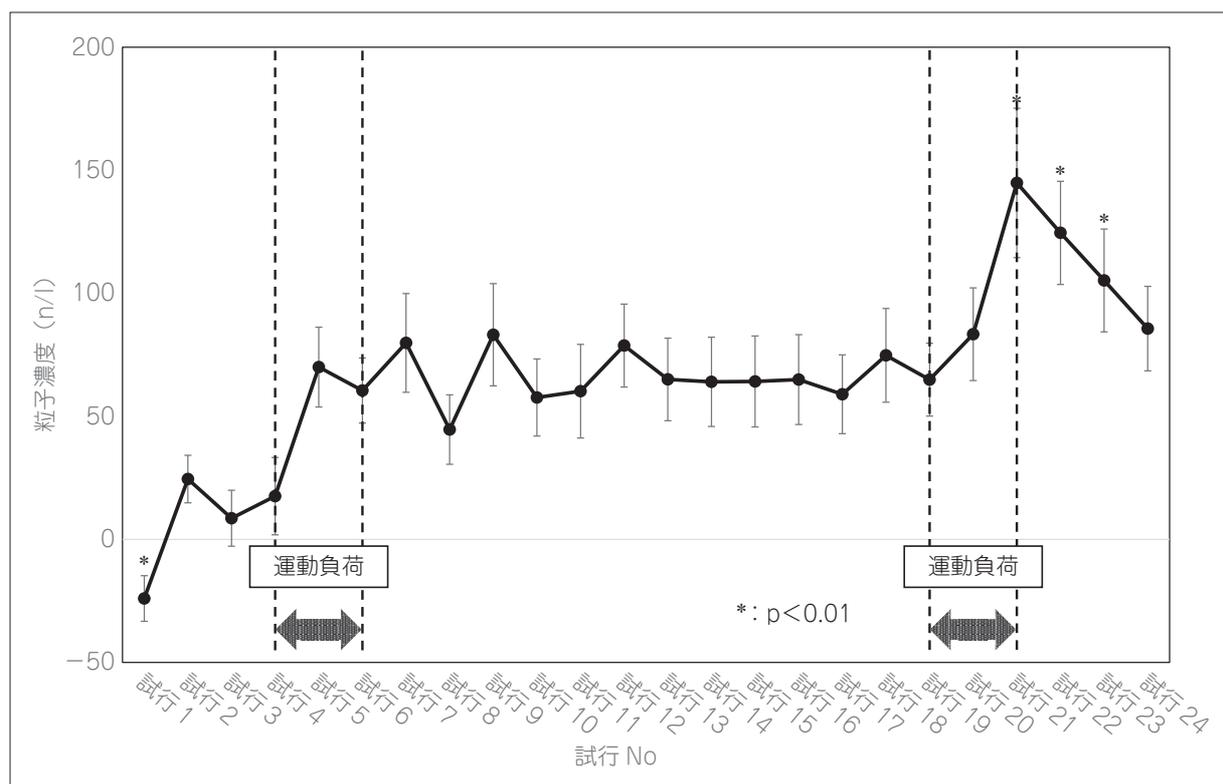


図4 粒子径 0.5 ~ 1.0μm 未満の粒子濃度の推移
* : 試行 1v.s. 試行 21 ~ 23

16 試行目との間の粒子濃度に有意差が認められた。さらにサンプリング 21 試行目とサンプリング 1~4, 8~19, 24 試行目との間の粒子濃度に有意差が認められた。

粒子径 2.0~5.0μm 未満の粒子濃度推移 (図6)

粒子径 2.0~5.0μm 未満では粒子径 1.0~2.0μm 未満と同様に運動課題に合わせた粒子濃度の上昇が認められた。サンプリング 5 試行目とサンプリング 2, 3, 11, 14~16 試行目との間の粒子濃度に有意差が認められた。さらにサンプリング 21 試行目とサンプリング 1~4, 8~17, 23, 24 試行目との間の粒子濃度に有意差が認められた。

考 察

本研究は運動負荷条件により呼気中から排出される飛沫・エアロゾル濃度の計測を行った研究である。エアロバイクを用いた運動負荷条件下での飛沫・エアロゾル濃度は粒子径ごとに異なる動態を示した。粒子径 0.3~0.5μm 未満, 0.5~1.0μm 未満は運動負荷の有無に関係なく、全試行を通じて粒子濃度が上昇を続けた。粒子径 1.0~2.0μm 未満, 2.0~5.0μm 未満は運動負荷とともに濃度の

上昇が見られ、運動負荷の停止とともに減少に転じた。粒子径 0.3~0.5μm 未満, 粒子径 0.5~1.0μm 未満は被験者周囲に長く滞留し、粒子径 1.0~2.0μm 未満, 2.0~5.0μm 未満は空気抵抗や重力の影響を受け速やかに落下したものと考えられた。

2020年3月時点で本邦に生じたCOVID-19による集団感染(クラスター)発生の中で、スポーツジム内で複数件の発生が認められたため、高い感染リスクの場として広く認識されるに至った。その後、部活動などでもクラスターの発生が報告されたが、部活動では寮生活などの集団生活に原因があると考えられた。また、他者との接触が濃厚となる競技種目では練習や大会などが開催中止に追い込まれる事態となった。2020年の秋以降は部活動などが再開しているものの、競技特性上に密の発生する競技や宿泊が求められる競技会での中止や縮小が継続している。しかしながら集団生活によるリスクを除いて、スポーツに潜む感染リスクの有無については不明な部分が多い。そこでスポーツによる飛沫および空気感染のリスクを検討するため、運動負荷と呼気中に排出される飛沫・エアロゾル濃度の計測を実施した。

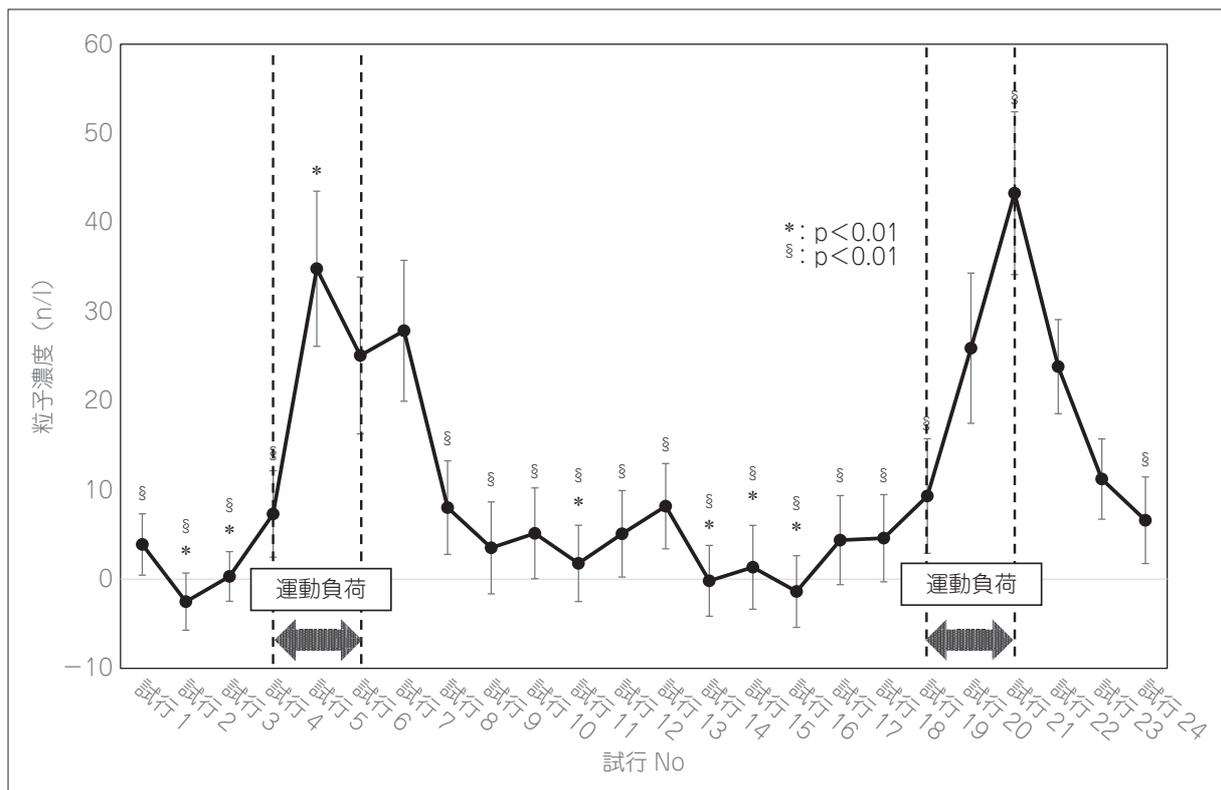


図5 粒子径 1.0～2.0 μ m 未満の粒子濃度の推移
 * : 試行 5v.s. 試行 2, 3, 11, 14～16
 § : 試行 21v.s. 試行 1～4, 8～19, 24

本研究の結果から、運動中の呼気中に含まれる飛沫・エアロゾルは粒子径ごとに異なる動態を示すため、粒子径に応じた感染対策が必要であると考えられた。現在スポーツジムなどで行われている対策ではトレーニングマシンや機器の間にビニールやアクリル製のパーテーションを配置している。図7に示すようなパーテーションを利用した感染予防対策は、飛沫をブロックする反面、エアロゾルを同一空間内に滞留させる恐れがある。飛沫は呼気と共に排出され、重力と空気抵抗の影響を受けて速やかに落下する。したがって、運動終了後の同一空間内には飛沫は存在しない。呼気が対象者に直接曝露される条件以外では、飛沫よりもエアロゾルを速やかに排除する手段を講じるべきである。パーテーションで隔離したトレーニングマシンやエアロバイクなどを使用する際には、①使用後の再利用までの時間間隔を空ける、②マシン間の間隔を大きく取る、③サーキュレーターを設置するなど室内の全体換気以外にマシン使用ごとの換気システムを検討する必要がある。パーテーションによる対象者個人の隔離はメ

リット・デメリットを考慮し、エアロゾルについても室内換気を効率よく実施して対応すべきである。

今回計測した粒子径 0.3～0.5 μ m 未満、0.5～1.0 μ m 未満はエアロゾルの定義の中でも微小なサイズである。このようなエアロゾルは上気道感染以外に下気道感染も生じさせる¹¹⁾。一方、くしゃみや咳といった上・下気道感染症の症状を介した感染は頻度としては少なく、通常の呼気中に含まれるエアロゾルを介した感染を予防すべきとの見解もある^{6,11)}。また、換気量や呼吸流速の増大に伴い、エアロゾル生成も増大する¹²⁾。このためスポーツ時には呼気に着目した感染予防策にも配慮する必要がある。したがって、呼吸生理学の観点からも飛沫よりもエアロゾルに着目した感染防止策に重点を置くべきではないかと考えられる。

今回パーティクルカウンターを用いた飛沫・エアロゾルの濃度計測は、一般環境下であるため、室内空間に存在する浮遊粉塵も同時に計測している。そのため計測時に観察される変動量から飛沫・エアロゾルの濃度を推定した。当初の実験計

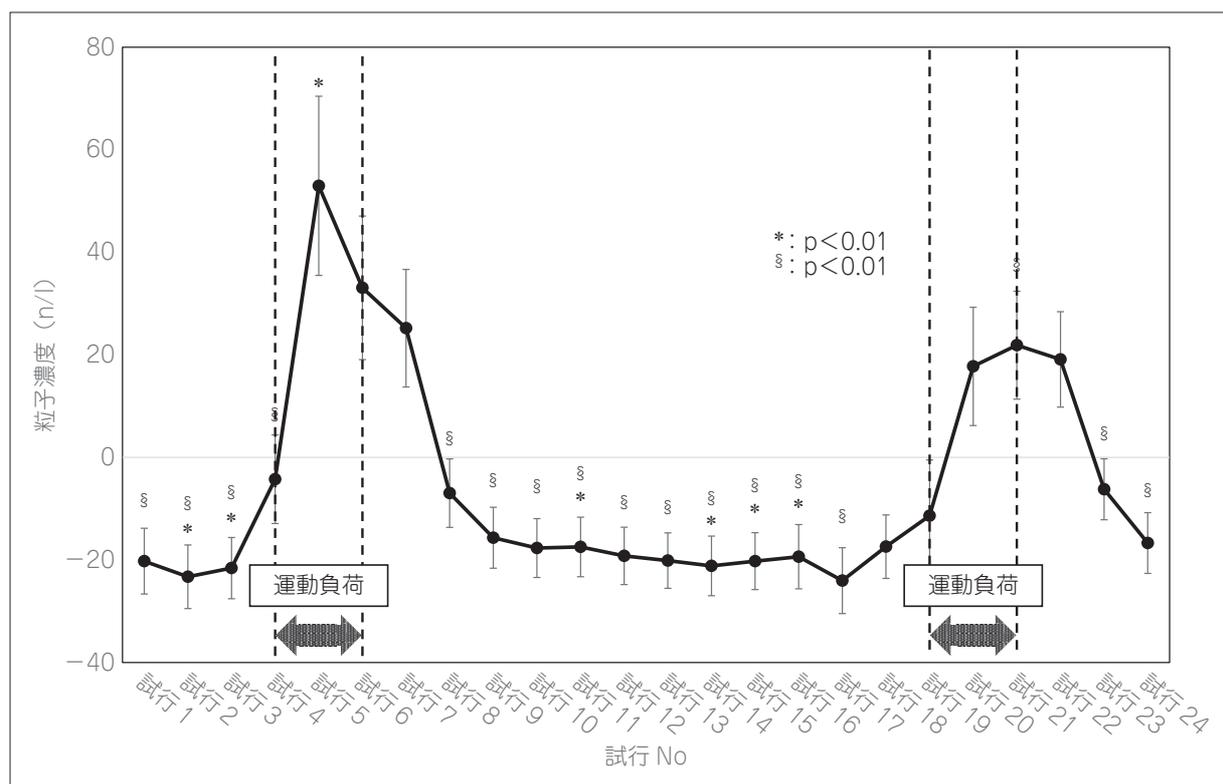


図6 粒子径 2.0 ~ 5.0 μ m 未満の粒子濃度の推移

* : 試行 5v.s. 試行 2, 3, 11, 14 ~ 16

§ : 試行 21v.s. 試行 1 ~ 4, 8 ~ 17, 23, 24



図7 スポーツジム等で行われているパーティションによる感染対策

画ではベースラインとして、N95 マスク装着下による安全を考慮した短時間の計測をベースラインに考えていた。しかしながら、本実験との時間差が生じると空調を停止させていたとしても浮遊粉塵量の変動が生じ、ベースラインとしての運用が困難であった。また、運動負荷のない状態でのペダリングは少量の飛沫・エアロゾル撒布が生じ、N95 マスク装着下よりも安定した粒子計測を行うことが出来たと考えられた。したがって、本研究

では運動負荷のない最初の1~3 試行をベースラインとし、計測課題中の連続データから比較検討した。一部のデータでは濃度がマイナスに転じているが、浮遊粉塵の変動による結果である。真の運動負荷中の飛沫・エアロゾル濃度を求めるためにはクリーンルーム環境下による計測が望ましいと考えられる。

本研究の結果は運動負荷時におけるエアロゾルの動態を明らかにした。しかしながら、本研究では負荷強度やパーティクルカウンターの設置位置・台数が一定であること、防護具の有無など具体的な感染対策を講じるためには検討すべき課題は多い。また、エアロゾルの動態は、競技特性やスポーツの実施環境からも大きく影響するものと考えられる。したがって、今後は本研究結果を基盤に応用的な研究に発展させていきたいと考えている。

新型コロナウイルスによるパンデミックは、未曾有の災害へと発展し、人と人の接触を余儀なくされるスポーツへの影響は計り知れない。感染症のリスクは今回始めて生じた事案ではなく、海外への遠征帯同時などにも多く生じている^{13,14}。規模

こそは異なるものの、感染症に対する考え方や対処法を改めて講じなくては、スポーツ界への脅威となる感染症は今後も続くであろう。スポーツやその環境に存在する感染リスクを明らかにすることが喫緊の課題である。誰もが自由にスポーツを楽しめる社会に戻すためにも、スポーツ医学に特化した感染リスクを明らかにすべきである。

結 語

本研究は健康成人によるインターバルトレーニングを用いた運動負荷と飛沫・エアロゾル濃度との関係を検討した。運動負荷と飛沫・エアロゾル濃度との関係は粒子径ごとに異なり、粒子径 0.3~0.5 μm 未満、0.5~1.0 μm 未満は運動負荷の有無とは関係なく増加を続け、粒子径 1.0~2.0 μm 未満、2.0~5.0 μm 未満は運動負荷に合わせた増減を示した。スポーツの感染予防対策として粒子径ごとに配慮した対策を行うべきと考えられた。

利益相反

本論文に関連し、開示すべき利益相反はなし。

文 献

- 野田 衛. 新型コロナウイルスの予防対策 一人ひとりの心がけて流行をおさえよう! パムサジャーナル. 2020; 32: 72-82.
- Morawska L, Cao J. Airborne transmission of SARS-CoV-2: The world should face the reality. *Environ Int.* 2020; 139: 105730 doi: 10.1016/j.envint.2020.105730.
- Morawska L, Tang JW, Bahnfleth W, et al. How can airborne transmission of COVID-19 indoors be minimised? *Environ Int.* 2020; 142: 105832 doi: 10.1016/j.envint.2020.105832.
- 薬のチェック編集委員会. 緊急提言 新型コロナウイルス感染症にどう対処するか. 薬のチェック: The Informed Prescriber. 2020; 20: 55-60.
- Infection Prevention and Control of Epidemic- and Pandemic-prone Acute Respiratory Infections in Health Care. World Health Organization. Geneva. 2014. Available at: https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/112656/9789241507134_en.pdf?sessionid=41AA684FB64571CE8D8A453C4F2B2096?sequence=1. [Accessed 20 April, 2021].
- 川名 明. Current Knowledge for ICT インフルエンザは空気感染するのか? *INFECTION CONTROL.* 2019; 28: 374-377.
- Anderson EL, Turnham P, Griffin JR, et al. Consideration of the Aerosol Transmission for COVID-19 and Public Health. *Risk Anal.* 2020; 40: 902-907 doi: 10.1111/risa.13500.
- Nishimura H, Sakata S, Kaga A. A new methodology for studying dynamics of aerosol particles in sneeze and cough using a digital high-vision, high-speed video system and vector analyses. *PLoS One.* 2013; 8: e80244 doi: 10.1371/journal.pone.0080244.
- Bin-Reza F, Lopez Chavarrias V, Nicoll A, et al. The use of masks and respirators to prevent transmission of influenza: a systematic review of the scientific evidence. *Influenza Other Respir Viruses.* 2012; 6: 257-267 doi: 10.1111/j.1750-2659.2011.00307.x.
- Liu X, Zhang S. COVID-19: Face masks and human-to-human transmission. *Influenza Other Respir Viruses.* 2020; 14: 472-473 doi: 10.1111/irv.12740.
- Yan J, Grantham M, Pantelic J, et al. Infectious virus in exhaled breath of symptomatic seasonal influenza cases from a college community. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 2018; 115: 1081-1086 doi: 10.1073/pnas.1716561115.
- Johnson GR, Morawska L. The mechanism of breath aerosol formation. *J Aerosol Med Pulm Drug Deliv.* 2009; 22: 229-237 doi: 10.1089/jamp.2008.0720.
- 白石 稔. 【サッカー日本代表チームに対する医学サポートの実際】代表チーム海外遠征時の健康管理の実際. *臨床スポーツ医学.* 2006; 23: 513-520.
- 能瀬さやか. ジュニアブロック・シンガポール遠征医事帯同報告. *水と健康医学研究会誌.* 2015; 18: 41-44.

(受付: 2021年3月31日, 受理: 2022年6月21日)

Different dynamics of expired droplets and aerosols by particle size during interval training

Watanabe, H. *, Kawabata, M. *, Takahira, N. *

* Kitasato University School of Allied Health Sciences, Department of Rehabilitation

Key words: COVID-19, droplets/aerosol, interval training

[Abstract] We aimed to determine droplet and aerosol concentrations during interval exercise using an aero bike. The participants were 39 healthy university students. Using Power Max V3, an anaerobic power test was performed in the first stage to determine the load used for middle power training. In the second stage, the determined load amount was used for 30 s each for two sets of full-power pedaling. A particle counter was used to measure the exhaled droplets and aerosol during the interval exercise.

The results showed an increase in particles with a diameter of 0.3 to < 0.5 μm and 0.5 to < 1.0 μm with the start of movement, and a tendency of the particle size to constantly increase during exercise. Particles with a diameter of 1.0 to < 2.0 and 2.0 to < 5.0 μm peaked under exercise load and decreased with exercise cessation. For particles with a diameter of 1.0 to < 2.0 μm and 2.0 to < 5.0 μm , there was a significant difference between the particle concentrations at the peak and exercise cessation.

During exercise, aerosols in the exhaled air showed different dynamics depending on the particle size. Infection-prevention measures during sport activities should therefore be designed according to the particle size of the aerosols or droplets that are emitted during different stages of exercising.