

労災疾病臨床研究事業費補助金

電動ファン付き保護具の実用性並びに普及に関する研究

(180302-01)

令和元年度総括・分担研究報告書

研究代表者 大神 明
産業医科大学 産業生態科学研究所
作業関連疾患予防学 教授

令和2(2020)年3月

目次

I. 総括研究報告	
電動ファン付き保護具の実用性並びに普及に関する研究	・ ・ ・ ・ ・ 3
大神 明	
II. 分担研究報告	
1. 冷風装置付き電動ファン付き呼吸用保護具による身体負荷軽減効果の検討	
安藤 肇, 池上 和範	・ ・ ・ ・ 1 5
2. 電動ファン付き呼吸用保護具装着による呼吸器負担への影響の検討	
安藤 肇, 池上 和範	・ ・ ・ ・ 6 3
3. ウェアラブル粉じん計を用いた職場環境の評価について	
安藤 肇, 池上 和範, 盛武 敬, 明星 敏彦, 保利 一	・ ・ ・ ・ 7 9
4. 現場での電動ファン付き呼吸用保護具装着の使用感に関する調査	
安藤 肇, 池上 和範	・ ・ ・ ・ 9 9
5. 電動ファン付き防じんマスク (PAPR) の着用直後と4週間後の装着における相違の検討	
岸本 卓巳	・ ・ ・ ・ 1 1 1
6. ウェアラブル粉塵測定デバイスの開発	
盛武 敬	・ ・ ・ ・ 1 2 7
III. 研究成果の刊行に関する一覧表	・ ・ ・ ・ 1 3 1

I . 総括研究報告

労災疾病臨床研究事業費補助金

I. 総括研究報告書

電動ファン付き保護具の実用性並びに普及に関する研究
(180302-01)

研究代表者 大神 明

産業医科大学 産業生態科学研究所 作業関連疾患予防学 教授

研究要旨

本研究は、電動ファン付き呼吸用保護具（PAPR）の実用性並びに普及を図るために、現場作業における PAPR を含む保護具装着による身体影響についてのデータ収集も行い、実際の現場作業に適した PAPR を含む呼吸用保護具の性能について提言することを目的としている。研究 2 年目である令和元年（2019 年）度は、①冷風装置付き電動ファン付き呼吸用保護具による身体負荷軽減効果の検討、②電動ファン付き呼吸用保護具装着による呼吸器負担への影響の検討、③ウェアラブル粉じん計を用いた職場環境の評価、④現場での電動ファン付き呼吸用保護具装着の使用感に関する調査、⑤電動ファン付き防じんマスク（PAPR）の着用直後と 4 週間後の装着における相違の検討、を行った。その結果、1) PAPR 装着時に冷却した呼気を導入すると、装着者の直腸温を下げる効果が期待できること、PAPR 装着により従来のマスクに比較して装着者の代謝への影響が少ない可能性があるという結果が得られ、高齢者や呼吸器疾患を背景に持つ作業者に PAPR を装着させた場合のメリットとなり得ると思われること、2) ウェアラブル粉じんモニターを改良し、これを作業時に装着することにより、リアルタイムでの粉じん曝露濃度予測や、作業環境濃度推測に有用である可能性があること、3) 現地調査によるマスクの漏れ率については、PAPR 着用により従来のマスク漏れ率が低減されること、装着感に対するアンケート調査では対象者すべてが PAPR 着用により呼吸が楽であると回答しており、PAPR 着用に対して良い感触が得られた、などの結果が明らかになった。

分担研究者

岸本卓巳	独立行政法人労働者健康安全機構アスベスト疾患研究・研修センター
明星敏彦	産業医科大学・産業生態科学研究所・労働衛生工学・教授
保利 一	産業医科大学・産業保健学部・作業環境計測制御学・教授
盛武 敬	産業医科大学・産業生態科学研究所・放射線健康医学 准教授
池上和範	産業医科大学・産業生態科学研究所・作業関連疾患予防学 講師
安藤 肇	産業医科大学・産業生態科学研究所・作業関連疾患予防学 助教

研究協力者

石垣 陽 電気通信大学・ヤグチ電子工業（株）

長谷川将之 日本製鉄(株)技術開発本部

宮本俊明 日本製鉄(株)君津製鐵所

永野千景 産業医科大学・産業生態科学研究所・産業保健管理学

世古口真吾 産業医科大学・産業生態科学研究所・作業関連疾患予防学

吉武英隆 産業医科大学・産業生態科学研究所・作業関連疾患予防学

A. 研究の目的

粉じんによる健康障害防止のためには、作業環境の改善と呼吸用保護具の装着が重要である。鉱業・採石業・鉄鋼業などは作業環境改善が困難であり、溶接業や金属研磨・切削業では粉じんの個人ばく露濃度が非常に高い可能性があり、呼吸用保護具の装着が必須と思われる。保護具装着に伴う呼吸抵抗性や顔面への圧迫感による負担感があり、海外では装着に際し医学適性検査を設ける必要があるとするガイドラインも存在する（RK McLellan, 2000, OEM Press）。近年、電動ファン付き呼吸用保護具（PAPR）が開発され、粉じんの防護性向上や装着に伴う身体負担の軽減に効果があるとされる。

本研究の目的は、現場作業における呼吸用保護具装着による心身への影響、PAPR 装着の有用性や負担軽減効果、防護性を明らかにし、適切な作業管理、健康管理に役立てること、および実際の現場作業や作業者の特性に適した呼吸用保護具の選定について普及啓発することで、じん肺等の健康障害の予防に繋げることである。

昨年度の研究では、①実際の現場で認められる作業者の呼吸用保護具の装着バリエーションや使用している呼吸用保護具の種類に関する調査、②装着方法による呼吸用保護具の漏れ率の検討、③通常防じんマスクと電動ファン付き防じんマスク（PAPR）における比較のためのもれ率の測定とアンケート調査、④

ウェアラブル粉塵測定デバイスの開発、⑤夏期の作業現場における呼吸用保護具の装着感に関する調査を実施し、1) 粉じん作業における保護具の装着実態においては、メリヤス使用やタオル使用、不適切な装着などの実態が明らかになったこと、2) マスクの漏れ率については、現場も含めメリヤスやタオル使用などでは漏れ率が高度になることが明らかになったこと、等を報告した。また、ウェアラブル粉じん測定デバイスの開発にも成果を上げ、本年度はその実用を検

証する段階となった。

今年度は、①冷風装置付き電動ファン付き呼吸用保護具による身体負荷軽減効果の検討、②電動ファン付き呼吸用保護具装着による呼吸器負担への影響の検討、③ウェアラブル粉じん計を用いた職場環境の評価、④現場での電動ファン付き呼吸用保護具装着の使用感に関する調査、⑤電動ファン付き防じんマスク（PAPR）の着用直後と4週間後の装着における相違の検討、を行った。

B. 研究の方法・内容

① 冷風装置付き電動ファン付き呼吸用保護具（PAPR）による身体負荷軽減効果の検討

暑熱環境下で冷風装置付き PAPR を使用し、核心温、心拍数といった客観的指標を測定することで、暑熱環境における身体負荷軽減効果を評価し、熱中症予防効果を検証した。

10名の被験者に対してクロスオーバー比較試験を実施した。PAPRとして興研株式会社のサカキ式 BL-321S 型、通常の防じんマスクとして同社のサカキ式 1180 型を用いた。冷風装置はスタッフ自作のものを使用した。

同一の被験者に対し、冷風装置付き PAPR を装着した条件、通常の PAPR を装着した条件、通常の防じんマスクを装着した条件の計3条件で、実験中10秒毎に直腸温、食道温、マスク内の温度（冷風装置を使用した際は装置内の呼吸用保護具側の温度）、心拍数を測定した。各装着条件において、被験者

は体重測定後、気温 28℃、相対湿度 45%（WBGT23℃）に設定した前室にて、安静状態で20分間前述4項目を測定した。その後、気温 36℃、相対湿度 45%（WBGT29℃）に設定した実験室にて、エルゴメーターで最大酸素摂取時の負荷の30%の負荷で30分間前述4項目を測定した。運動終了後、前室にて安静状態で20分間同様に前述4項目を測定した。その後、再度体重測定を行った。

② 電動ファン付き呼吸用保護具装着による呼吸器負担への影響の検討

PAPR 装着による身体負荷を総合的に評価するため呼気ガス分析を行い、PAPR と通常防じんマスクの消費エネルギーについて検討した。

対象者は10名でクロスオーバー比較試験を実施した。通常の防じんマスク（DM）として株式会社重松製作所製 DR70SDC2、PAPR として同社製の Sy11 を用いた。呼気ガス分析には有限会社アルコシステム社製 ARCO-2000 を用いた。

排気弁から排出される呼気のみを捕集するため専用のアタッチメントを作製した。

人工気候室にて気温 20 度、相対湿度 50% の環境下において10分間安静ののち20分間エルゴメーターにて70W の運動負荷を行い、呼気ガス分析計にて算出された消費エネルギー量を検討した。

③ ウェアラブル粉じん計を用いた職場環境の評価について

環境中の粉じん濃度を随時測定し

可視化するために、スマートフォン接続型の小型のウェアラブルパーティクルモニター（ヤグチ電子工業株式会社）を試作した。本研究の目的は、第一に、ウェアラブルパーティクルモニターの信頼性・妥当性検証を行い、その有用性を検討すること、第二にウェアラブルパーティクルモニターを、実際の粉じん発生職場環境で用い、取得したデータから職場の粉じん濃度が高い場所の特定が可能かを調査することである。前者は、実験室の粉じんばく露チャンバーを用いて実施し、後者は、屋外粉じん発生事業場で実施した。

④ 現場での電動ファン付き呼吸用保護具装着の使用感に関する調査

実現場において継続的に PAPR を使用した場合の使用感の評価を行い、現場における PAPR 装着による効果を明らかにすることを目的として、43 名の被験者に対する介入研究を実施した。まず事前調査として現病歴、既往歴、作業歴、嗜好品等について調査票を用いて調査した。既に呼吸機能検査を実施している被験者は、その呼吸機能検査結果の提出を持って完了とした。次に、1 回目調査として、PAPR を 1 カ月間連続して装着して業務を行ってもらい、1 カ月終了後に被験者に対して呼吸用保護具装着の使用感に関する調査票を実施した。

⑤ 電動ファン付き防じんマスク（PAPR）の着用直後と 4 週間後の装における相違の検討

通常防じんマスクと PAPR 装着によ

るマスクのもれ率を測定するとともに、PAPR を初めて着用して 3 時間後と 4 週間継続して着用した後での PAPR の装着に関するアンケート調査を行なった。対象は黒鉛等を製造している作業員 14 名と耐火物粉碎等作業を行っている 14 名でいずれも常時粉じん作業を行っており、防じんマスクを着用している作業員であった。

興研社製 BL-1500 型 PAPR と重松製作所製 Sy-11 型 PAPR を各 14 名の粉じん作業員に貸与して、着用開始 3 時間後と 4 週間継続で着用した後の PAPR の装着感についてアンケート調査した。また、粉じん作業開始時に、従来から着用していた通常防じんマスクのもれ率を測定するとともに、新たに貸与した PAPR のもれ率を着用 3 時間後に測定した。防じんマスクのもれの測定機器は柴田科学社製のマスク内圧・フィッティングテスター（MNFT ver.2）を着用した。

両作業場の各 2 名では個人サンプラーを用いて、個人の吸入粉じん濃度（総・吸入性粉じん濃度）を測定した。個人ばく露濃度とマスクのもれ率から作業員の吸入粉じん濃度（総・吸入性粉じん濃度）を換算した。

C. 研究結果

① 冷風装置付き電動ファン付き呼吸用保護具（PAPR）による身体負荷軽減効果の検討

全被験者のマスク内温度の平均は、冷風 PAPR を使用した条件では、それ以外の

条件と比較して、10°Cほど低く保たれた。全被験者の直腸温差分の平均は、冷風 PAPR を使用した条件では、それ以外の条件と比較して、運動開始以降は低く保たれた。全被験者の食道温差分の平均と心拍数の平均は、冷風 PAPR を使用した条件とそれ以外の条件とで、明らかな差はないように見受けられた。各測定条件における体重減少率は、冷風 PAPR を使用した条件では、それ以外の条件と比較して、低かった。

② 電動ファン付き呼吸用保護具装着による呼吸器負担への影響の検討

安静時（0～9分）の平均消費エネルギー量（標準偏差）は DM92.0（26.6）W，PAPR86.5（29.4）W であった。運動時は運動開始直後のデータを除いた 12 分～30 分のデータにおいて、平均消費エネルギー（標準偏差）は DM441.5（47.3）W，PAPR414.6（50.4）W であった。PAPR は DM と比較して消費エネルギー量が少ない可能性が示唆された。

③ ウェアラブル粉じん計を用いた職場環境の評価

第一実験では、ウェアラブルパーティクルモニターの信頼性・妥当性検証を行い、その有用性を検討すること、第二実験では、ウェアラブルパーティクルモニターを、実際の粉じん発生職場環境で用い、取得したデータから職場の粉じん濃度が高い場所の特定が可能かを調査することを行った。

第一実験では、ウェアラブルパーティクルモニターは物質の種類や粒形にかかわらず、同一の質量濃度係数 K 値を使用

しているため、粒子数（CPM）との整合性は保たれていたが、質量濃度との整合性は良くなかった。各ウェアラブルパーティクルモニターの測定値の挙動は同様の傾向があったが、機器間で測定値の乖離を認めた。

第二実験では、ウェアラブルパーティクルモニターを、実際の粉じん発生職場環境で用い、取得したデータから職場の粉じん濃度が高い場所の特定が可能かを調査した。現地調査の結果から、屋外粉じん発生職場の測定ルートとウェアラブルパーティクルモニターによる粉じん測定値の推移を Microsoft excel を用いてヒートマップ化し、粉じん濃度が高濃度と予想される場所でのモニターによる測定結果との相関性をグラフィカルに確認することができた。

④ 現場での電動ファン付き呼吸用保護具装着の使用感に関する調査

2020 年 2 月末日現在、株式会社テツゲン津支店内における 1 回目調査までが終了した。事前調査と比較して装着後に使用感が上昇していた項目は、吸気時・呼気時の息苦しきであり、逆に減少していた項目は、保護具の重さと装着感であった。また自覚症状について 1 回目調査時に比較的訴えの多い項目は、装着時のイライラ、不安感、落ち着かない感じ、であった。

⑤ 電動ファン付き防じんマスク（PAPR）の着用直後と 4 週間後の装着における相違の検討

対象者は男性 27 名で、年齢の中央値は 45.5 歳であった。1 日の作業時間は平均 7 時間で、粉碎、粉詰出等の粉じん量の多い

作業で、作業年数は15年であった。測定の結果、通常防じんマスクのもれ率は17.57%、PAPRは0.36%であった。耐火物粉砕等事業場では正しい装着方法の指導を受けていたこともあり、通常防じんマスクのもれ率が12.7%であった。しかし、通常防じんマスクのもれ率が19.32%ある場合、個人ばく露濃度測定結果を基に吸入粉じん量を換算すると0.25mg/m³となり、許容濃度を超えるが、PAPRでは0.00006mg/m³であった。

また、PAPRを着用して開始後3時間と4週間の装着感についてアンケート調査したところ、大きさや重さなどのデメリットもあったが、呼吸が楽で粉じんを吸入しないなどのメリットにより80%を超える作業者が、着用直後のみならず4週間後であっても着用したいという回答であった。特に通常防じんマスクのもれ率が少なかった作業場でも大多数の作業者がPAPRを着用したいという回答であった。

D. 考察

電動ファン付き保護具(PAPR)は、昨年度の報告書より、夏季においてPAPRの装着が息苦しさよる不快感を軽減し、その装着による精神的ストレスは通常の防じんマスクより優れている可能性が示唆されているが、PAPRは楽に外気を取り込むことから、この外気をあらかじめ冷却することができれば身体負荷軽減につながり、熱中症の予防効果にもなり得るのではないかと考えた。本研究費で独自に呼気冷却装置を開発し、実験室内でその効果を調査したところ、冷風PAPRを使用

した条件では、通常PAPRあるいは防じんマスクを使用した条件と比較して、被験者は10℃ほど低い空気を吸入していたと考えられ、効果的な冷却装置付きPAPRを用いて作業負荷試験を実施することができた。その結果、全被験者の直腸温差分の平均は、冷風PAPRを使用した条件では、通常PAPRあるいは防じんマスクを使用した条件と比較して、運動開始以降は低く保たれ、冷風PAPRによる冷氣吸入が直腸温上昇を抑制したと考えられる。

全被験者の食道温差分の平均と心拍数の平均は、冷風PAPRを使用した条件と通常PAPRあるいは防じんマスクを使用した条件とで、明らかな差はないように見受けられた。本実験における測定条件では、食道温上昇や心拍数上昇に明らかな影響を与えずに直腸温のみに影響を与えることが示されたことは、冷風装置付きPAPRは通常のPAPRや通常の防じんマスクと比較し、暑熱環境下における身体負荷を軽減させる可能性が示唆された。

また、PAPR装着が呼吸機能へどのように負担を軽減するかについて、安静時の消費エネルギーについては一般的なDM、PAPRともに概ね同等の水準で推移しており、正常な測定が実施できたものと推察された。運動時についてはPAPRが継続的にDMの消費エネルギーを下回り、PAPRの方が代謝への影響が少ない可能性があるという結果を得た。このことは、高齢者や呼吸器疾患を背景に持つ作業者にPAPRを装着させた場合のメリットとなり得ると思われる。

労働安全衛生法では、事業者に対し、有害な業務を行う作業場で作業環境測定の

実施を義務付けているが、厚生労働省は2020年2月に、作業環境測定を行う際のデザインとサンプリングとして、個人サンプリング法を選択的に導入することを可能とし、個人サンプリング法による作業環境測定の適切な実施を図るため、法令で定める事項のほか、事業者が実施すべき事項を一体的に示すものとして、「個人サンプリング法による作業環境測定及びその結果の評価に関するガイドライン」を策定した。

このような流れの中で、個人の粉じん曝露濃度を簡便的にモニタリングするウェアラブルパーティクルモニターの信頼性・妥当性検証を行い、その有用性を検討すること、ウェアラブルパーティクルモニターを、実際の粉じん発生職場環境で用い、取得したデータから職場の粉じん濃度が高い場所の特定が可能かを調査検討した。前者は、実験室の粉じんばく露チャンバーを用いて実施し、後者は、屋外粉じん発生事業場で実施された。いくつか今後改良すべき点が明らかになったが、ウェアラブルパーティクルモニターは、センサーごとの差異はあるが環境中の粉じん濃度の挙動は、リアルタイムで粉じん濃度の変化計測することができ、粉じん濃度が高い場所の測定や粉じんが発生しやすい時間帯などの特定が可能である。また、濃度分布をヒートマップとして視覚的に提示できることから、職場内で環境の粉じん濃度が高低の評価が十分可能であると思われた。今回の調査は屋外環境のみであったが、作業者のいる屋内環境中においても、場所の同定について工夫できれば、単位作業場所内

での粉じん濃度の推定が可能となり、粉じんばく露状況の把握に有用であると考えられた。

現地調査では、分担研究者の岸本らは昨年度に続いて今年度も、通常防じんマスクとPAPRのマスクのもれ率について調査を行った。今年度は、常時粉じん作業を行なう黒鉛製造等作業員14名と耐火物粉砕等作業員14名の計28名を対象とした。

28名すべての通常防じんマスクのもれ率は、中央値17.57%で、PAPRは0.36%であった。一方、黒鉛製造等作業員の通常防じんマスクのもれ率が22.66%であったのに対して耐火物粉砕等作業員では12.70%と過去に通常防じんマスクのもれ率を測定した企業の中ではもれ率が最も低かった。

作業員の吸入粉じん量を個人ばく露濃度にマスクのもれ率と呼吸量を考慮して計算したところ、耐火物等粉砕等作業員のDでは、通常防じんマスクのもれ率が19.32%あると吸入粉じん量が $0.25\text{mg}/\text{m}^3$ となり、許容濃度の $0.15\text{mg}/\text{m}^3$ を超えることになるが、PAPRでは $0.00006\text{mg}/\text{m}^3$ で新たなじん肺発生の危険性が大きく低下することになると思われた。

今年度は短時間PAPRを着用するのみならず、4週間毎日PAPRを着用した後の感想についても調査した。マスクの装着感等大きさは60%程度、重さは100%が着用開始直後は感じてはいたが、長期間着用することで約15%の作業員がその重さを感じなくなっていた。一方視野への影響や動きにくさを感じる作業員は4週間後の結果もほぼ同様であった。

また、マスク内への粉じんのもれを感じるあるいは粉じん吸入を感じる作業者は、着用当初においても4週間後でもほとんどなかった。

作業効率の低下については、当初は3.6%、4週間後では14.3%が低下したと述べていたが、作業後の疲労感が減少した作業者ははじめが32.1%であったが4週間後には35.7%とほぼ同様であった。さらに呼吸が楽になったと答えた作業者は当初から4週間後まで100%であり、今後PAPRを着用したいと答えた作業者は当初は92.6%、4週間後は82.1%と大半であった。特に通常防じんマスクが比較的適正に着用されている作業者においてもPAPRを着用したいと回答したが、ほぼ全例であったことは、PAPRの大きな評価につながるとされる。なお、着用の推進に問題があるとするならば、高額である費用とどれくらいの耐用性があるかが問題であろうと思われる。

E. 結論

以上、全体をまとめると、1) PAPR装着時に冷却した呼気を導入すると、装着者の直腸温を下げる効果が期待できること、PAPR装着により従来のマスクに比較して装着者の代謝への影響が少ない可能性があるという結果を得た。このことは、高齢者や呼吸器疾患を背景に持つ作業者にPAPRを装着させた場合のメリットとなり得ると考えられた。2) ウェアラブル粉じんモニター装着により、リアルタイムでの粉じん曝露濃度予測や、作業環境濃度推測に有用である可能性があること、3) 現地調査によるマスクの漏れ率について

は、PAPR着用により従来のマスク漏れ率が低減されること、装着感に対するアンケート調査では対象者すべてがPAPR着用により呼吸が楽であると回答しており、PAPR着用に対して良い感触が得られた、などの結果が明らかになった。

計画最終年度の2020年度は、現地調査としては、PAPRを粉じん作業従事者に比較的長期間貸与し、PAPRの長期着用に関する以下の調査を行う予定である。

- 1) 様々な作業におけるPAPRの漏れ率調査。(前年度までの調査研究の継続)
- 2) PAPR長期使用による使用感・使用実態に関する質問票を基本とした調査。
- 3) 本研究班で開発したウェアラブル粉じん計を用いた粉じん作業中曝露実態の調査と粉じん計の精度改良とバージョンアップ。さらに可能であれば健診結果による健康状態との関係解析。
- 4) 教育ツールの作成：粉じん作業場でのPAPRを含む呼吸用保護具の装着率および装着性向上のために、教育用ツールを作成する。

さらに、平成30年(2018年)度～令和2年(2020年)度の結果のまとめを行い、将来的かつ持続的に可能なじん肺対策におけるPAPRを含む呼吸用保護具の活用についての政策提言をまとめる。

F. 健康危険情報

なし

G. 研究発表

1. 論文発表

A survey on methods of wearing respiratory protective equipment and

awareness of respiratory protection among workers engaged in dust-generating work.

Shirasaka T, Ando H, Ikegami K, and Ogami A.

Environ Occup Health Practice doi:10.1539/eohp. 2019-0005-FS

現場で認める装着方法の漏れ率の検討
世古口真吾, 吉武英隆, 白坂泰樹, 安藤肇,
池上和範, 大神 明

Clean Health Safety NEWS 11月号 p8-11,
2019

2. 学会発表

現場で認める非推奨な装着法で呼吸用保
護具を装着した際の漏れ率 白坂泰樹,

安藤肇, 池上和範, 大神明 第92回 日
本産業衛生学会 名古屋 2019.5

ウェアラブル粉じん計試作機の性能評価
世古口真吾, 盛武敬, 吉武英隆, 安
藤肇, 池上和範, 石垣陽, 明星敏彦, 大神
明, 第29回 日本産業衛生学会全国協議
会 仙台 2019.9

H. 知的財産権の出願・登録状況（予定
を含む。）

1. 特許取得
特願 2020-2928
2. 実用新案登録
該当なし
3. その他
該当なし

II. 分担研究報告

令和元年度労災疾病臨床研究事業費補助金
分担研究報告書

冷風装置付き電動ファン付き呼吸用保護具による身体負荷軽減効果の検討

研究分担者 安藤 肇¹⁾, 池上 和範¹⁾

研究協力者 永野 千景²⁾, 世古口 真吾¹⁾, 吉武 英隆¹⁾

1) 産業医科大学 産業生態科学研究所 作業関連疾患予防学

2) 産業医科大学 産業生態科学研究所 産業保健管理学

研究要旨

暑熱環境下で冷風装置付き PAPR を使用し、核心温、心拍数といった客観的指標を測定することで、暑熱環境における身体負荷軽減効果を評価し、熱中症予防効果を検証する。10名の被験者に対してクロスオーバー比較試験を実施した。PAPRとして興研株式会社のサカキ式 BL-321S 型、通常の防じんマスクとして同社のサカキ式 1180 型を用いた。冷風装置は産業医科大学作業関連疾患予防学のスタッフが自作したものを使用した。同一の被験者に対し、冷風装置付き PAPR を装着した条件、通常の PAPR を装着した条件、通常の防じんマスクを装着した条件の計 3 条件で実験を行った。各条件での実験において、被験者は体重測定を行った。その後、気温 28℃、相対湿度 45% (WBGT23℃) に設定した前室にて、安静状態で 20 分間測定した。その後、気温 36℃、相対湿度 45% (WBGT29℃) に設定した実験室にて、エルゴメーターで最大酸素摂取時の負荷の 30% の負荷で 30 分間測定した。運動終了後、前室にて安静状態で 20 分間測定した。その後、再度体重測定を行った。実験中 10 秒毎に直腸温、食道温、マスク内の温度（冷風装置を使用した際は装置内の呼吸用保護具側の温度）、心拍数を測定した。全被験者のマスク内温度の平均は、冷風 PAPR を使用した条件では、それ以外の条件と比較して、10℃ほど低く保たれた。全被験者の直腸温差分の平均は、冷風 PAPR を使用した条件では、それ以外の条件と比較して、運動開始以降は低く保たれた。全被験者の食道温差分の平均と心拍数の平均は、冷風 PAPR を使用した条件とそれ以外の条件とで、明らかな差はないように見受けられた。各測定条件における体重減少率は、冷風 PAPR を使用した条件では、それ以外の条件と比較して、低かった。冷風装置付き PAPR は通常の PAPR や通常の防じんマスクと比較し、暑熱環境下における身体負荷を軽減させる可能性が示唆された。冷風装置付き PAPR は熱中症予防に有効である可能性がある。

A. 研究目的

暑熱環境下での身体作業では、熱中症発生の危険がある。特に、呼吸用保護具装着が求められる鉄鋼業・鉱業・採石業などは暑熱環境下での作業が多く、熱中症対策の必要性が高い。冷気を吸入することで核心温が低下し熱中症対策につながりうることは過去の研究で示唆されているが[1, 2]、呼吸用保護具を装着して行う作業中に冷気を吸入することが暑熱環境下における労働負荷を軽減することを、客観的指標を用いて評価した研究は今までにない。

呼吸用保護具は、じん肺をはじめとする健康障害を防止するために多くの事業場で使用されている。その中でも電動ファン付き呼吸用保護具（Powered Air Purifying Respirators, 以下 PAPR）は、マスク内を陽圧に保ち防護性を高めるために、電動ファンとバッテリーを使用してマスク内に送気している。今回、我々は常時空気を送り込むという PAPR の性質に注目し、PAPR にラジエーターとポンプで自作した冷風装置を取り付け、暑熱環境下での冷気吸入の有用性を検証するツールとして採用することにした。

本研究では、暑熱環境下で冷風装置付き PAPR を使用し、核心温、心拍数といった客観的指標を測定することで、暑熱環境における身体負荷軽減効果を評価し、熱中症予防効果を検証することを目的とする。熱中症は夏季を中心に依然として頻発している重大な作業関連疾患であり、本研究により、冷風装置付き PAPR の使用による核心温の抑制効果が認められれば、熱中症発生件数の

低減につながるが見込まれる。

B. 研究方法

1. 研究デザインとセッティング

参加同意の得られた被験者に対して、クロスオーバー比較試験を実施した。調査は、産業医科大学人工気候室で、2019年10月から12月まで実施した。

2. 被験者

被験者の選定には健康な成人男性という条件を設定した。産業医科大学内にて被験者を募集し、参加同意を得られた10名を対象とした。平均年齢(標準偏差)は25.9(7.42)歳であった。

3. 呼吸用保護具

本研究で用いた呼吸用保護具は、PAPR は興研株式会社サカキ式 BL-321S 型を用いた。防じんマスクは興研株式会社サカキ式 1180 型を使用した。

4. 冷風装置の作成

本研究で使用した冷風装置は、産業医科大学作業関連疾患予防学のスタッフが自作したものを使用した。

冷却方法には主に水冷式と空冷式があるが、暑熱環境下での連続する熱交換を想定し、より冷却効率の高い水冷式を選択した。基本構造は、冷却部で冷やしたクーラント液をポンプにより循環させ、ラジエーターを通過させることでラジエーター周囲の空気を冷却させる装置である。ラジエーター

周囲の冷えた空気が大気中に放散しないよう、PAPRの吸入部にラジエーターが近接し、かつ密閉構造となるアタッチメントを作成した。アタッチメント底部に吸気ゴム弁（興研製）を取り付けることで密閉性を高めた。

アタッチメントは、3D CAD（Autodesk社製 Fusion360）にてモデリングを行い、3Dプリンタ（Flashforge社製 Creator3）で出力した。素材はABSを用いた。アタッチメントの図面を図1に示す。

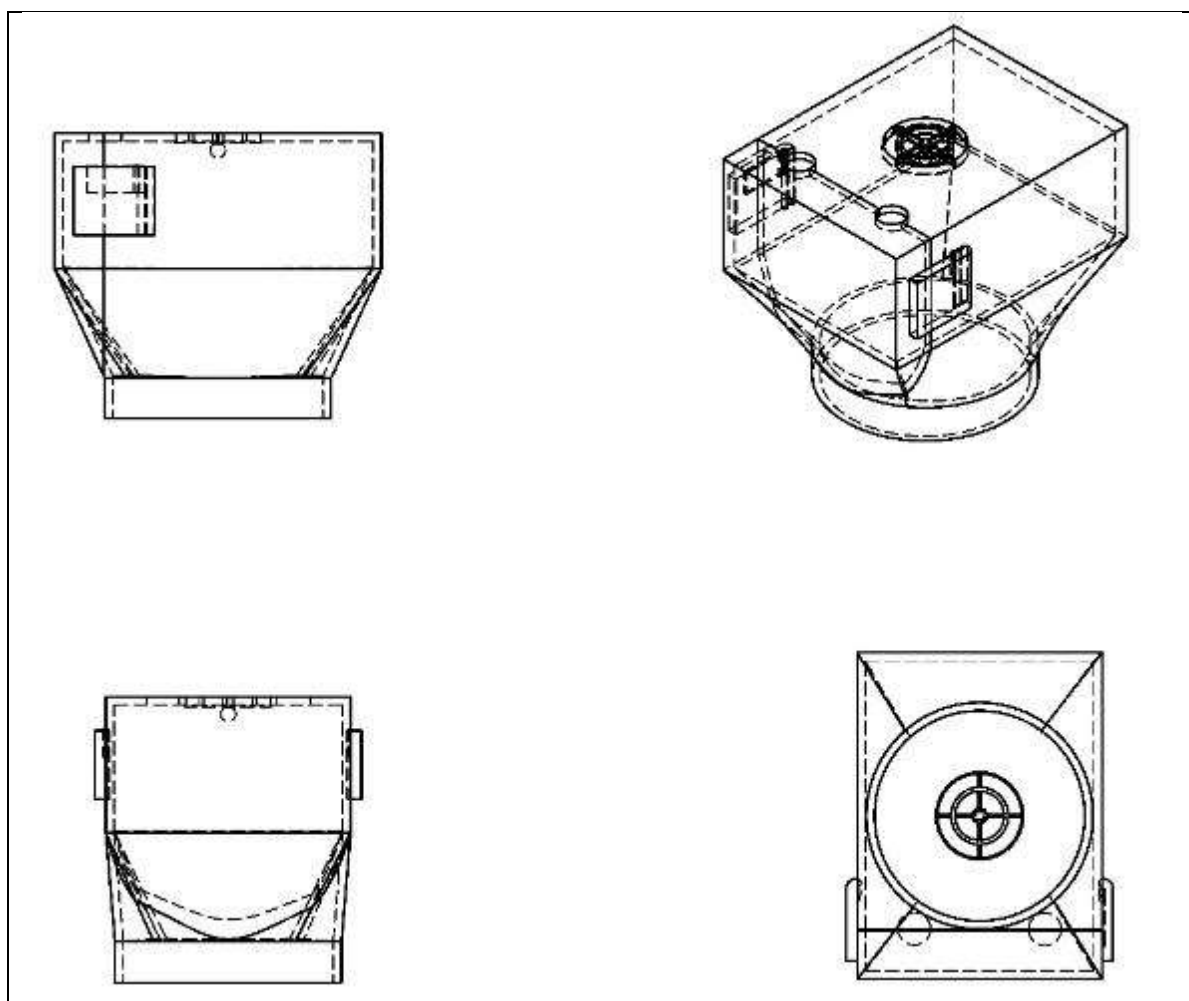


図1 アタッチメントの図面

冷却部は銅管を加工し、保冷剤と接触することで銅管内のクーラント液を冷やすことが出来る。市販の保冷剤（倍速凍結・氷点

下パックXLなど）を使用することを想定し、かつ着脱が容易となるよう図2の様に銅管を加工した。



図2 試作段階の冷却部

銅管はパイプベンダーの半径より小さく曲げることが困難であるため、銅管エルボー（90度）を使用することで保冷剤のサイズ内で折り返すことに成功した。しかし銅管とエルボーの接続にろう付けを行わず、金属用の接着剤を用いたため、クーラント液の漏出を認めた。また、銅管の加工が複雑化したことにより、銅管と保冷剤の間に隙

間が生じ、冷却効率が上がらなかったため冷却部の構造変更を検討した。

1本の銅管(3m)の加工可能範囲内で保冷剤との接触面を最大限増やすことを検討した結果、保冷剤を円筒状にし、その周囲に巻き付けるように銅管をらせん状に加工することとした。円筒状保冷剤を図3に、冷却部を図4に示す。



图 3 円筒状保冷剤



图 4 円筒状保冷剤

銅管の内側に円筒状の保冷剤、外側にジェル状保冷剤を装着し、銅管と保冷剤の間に熱伝導シートを貼り付けることで、より冷却効率をあげた。冷却部、ラジエーター、ポンプはチューブで接続し、1つの回路とした。チューブによる熱損失を

考慮し、チューブには断熱テープを巻き付けた。クーラント液の補充や、液温測定のために回路内にリザーバータンクを挿入した。冷風装置の模式図を図5に、冷風装置の全景を図6に示す。なお、本装置は特許出願中である（特願 2020-2928）。

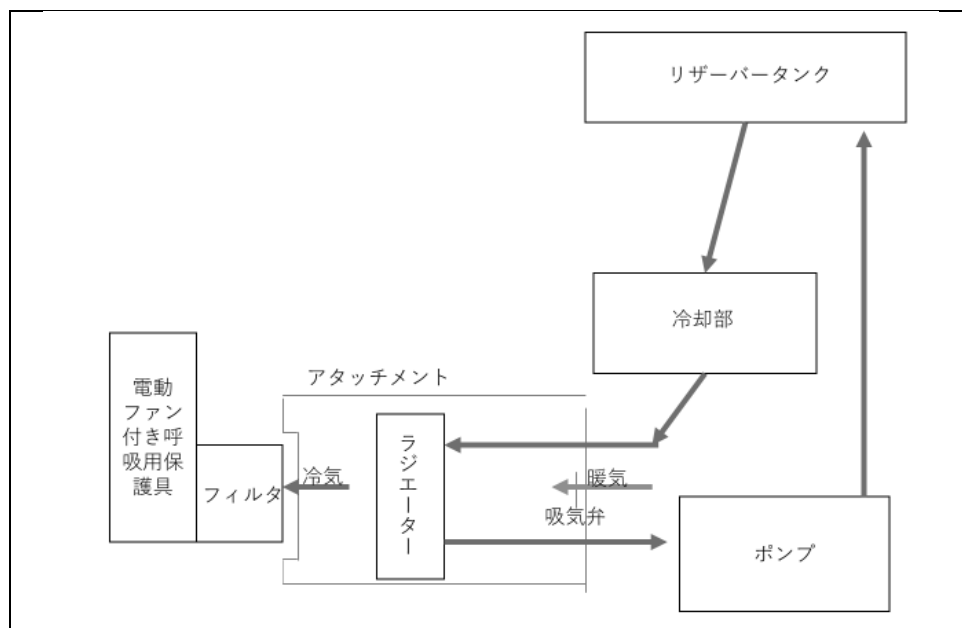


図5 冷風装置の模式図

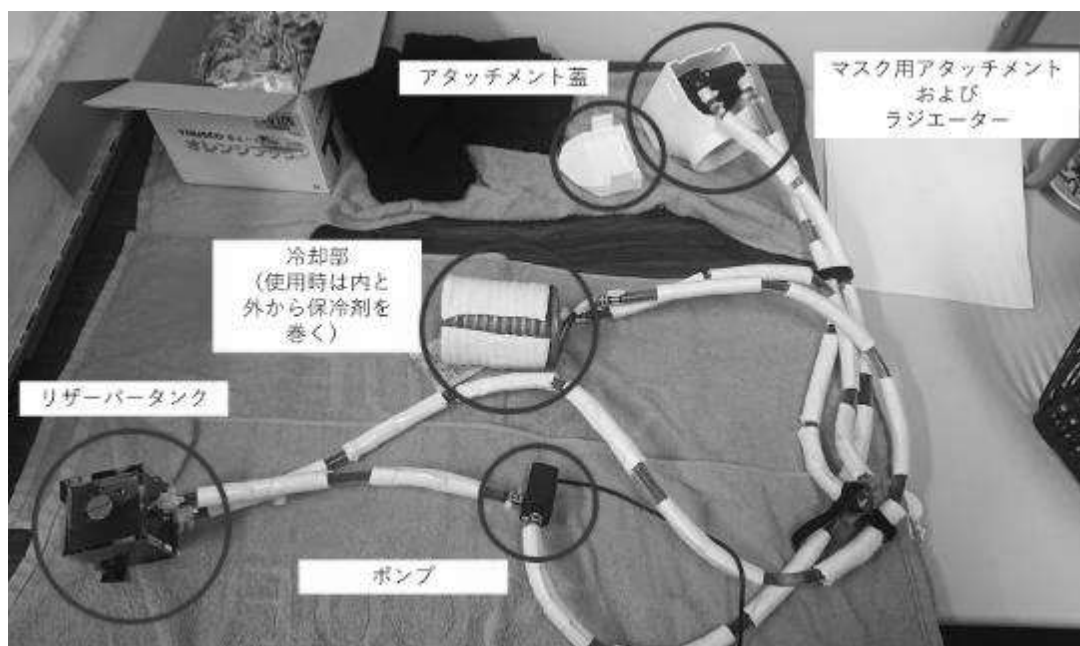


図6 冷風装置全景

5. 実験手順

5. 1 最大酸素摂取時の負荷の測定

暑熱環境下での実験当日までに、各被験者に対し、最大酸素摂取時の負荷 (W) の測定を行った。測定は気温 25°C、相対湿度 50% に設定した人工気候室で行った。被験者は呼気ガスマスク及び心拍モニターを装着し、まずは椅子に座って 5 分間安静にし、次にエルゴメーター上で 2 分間安静にし、その後エルゴメーターで運動を行った。運動は 20W から開始し、1 分毎に 10W ずつ負荷を上げていった。測定中は HR (bpm) を記録し、80%HRR に達した時点までの負荷で運動を終了した。なお、80%HRR は以下の式により算出した。

$$80\%HRR = (\text{最大 HR} - \text{安静時 HR}) * 0.8 + \text{安静時 HR}$$

また、最大 HR は以下の式により算出した。

$$\text{最大 HR} = 208 - 0.7 * \text{年齢}$$

呼気ガス分析計は有限会社アルコシステム社製 ARCO-2000 を用いた。呼気代謝計測モジュール (ARCO-2000-MET) の Breath by Breath モードで呼気を毎回検知し、分析を

行った。

本測定では、酸素摂取量 (ml/min/kg) と HR を 10 秒毎に計測した。そして、各負荷での運動時の 40 秒経過時と 50 秒経過時の酸素摂取量の平均値を、当該負荷での酸素摂取量とした。同じく、各負荷での運動時の 40 秒経過時と 50 秒経過時の HR の平均値を、当該負荷での HR とした。以上の方法で、40W から計測終了時の負荷までの各負荷における酸素摂取量と HR を算出した。そのうえで、「40W から計測終了時の負荷における酸素摂取量」と「40W から計測終了時の負荷における HR」から求められる回帰直線を基に、最大 HR の値に対する酸素摂取量の値 (最大酸素摂取量) を算出した。そして、「40W から計測終了時の負荷」と「40W から計測終了時の負荷における酸素摂取量」から求められる回帰直線を基に、最大酸素摂取量の値に対する負荷の値 (最大酸素摂取時の負荷) を算出した。

測定風景を図 7 に示す。



図7 最大酸素摂取時の負荷の測定風景

5. 2 暑熱環境下での実験

同一の被験者に対し、冷風装置付き PAPR を装着した条件、通常のパ PR を装着した条件、通常防じんマスクを装着した条件の計3条件で、1人当たり1日1回、3日間の計3回実験を行った。実験順序は無作為化割り付けを行った。

実験の手順は以下の通りである。

被験者はタオル1枚で体重測定を行い、その後作業着に着替え、気温28℃、相対湿度45% (WBGT23℃) に設定した人工気候室(前室)に入室後、各種温度計及び心拍モ

ニターならびに呼吸用保護具(冷風装置付き PAPR、通常のパ PR、通常防じんマスクのいずれか)を装着した。まずは安静状態で20分間測定を行い、その後5分間で気温36℃、相対湿度45% (WBGT29℃) に設定した人工気候室(実験室)に移動しエルゴメーター上に着席したのち、運動時の測定を行った。運動は、エルゴメーターを用いて、前述の方法で算出した最大酸素摂取時の負荷の30%の負荷で30分間行い、運動終了後5分間で前室に移動し、安静状態で20分間測定した。これらが終了した後に各種温度計

及び心拍モニターならびに呼吸用保護具を外し、再度タオル 1 枚で体重測定を行い実験終了とした。

測定項目は、直腸温、食道温、マスク内の温度（冷風装置を使用した際は装置内の

呼吸用保護具側の温度）、心拍数である。これらを実験中 10 秒毎に測定し記録した。

測定風景を図 8 に、測定概要を図 9 に示す。



図 8 暑熱環境下での実験の測定風景（冷風装置付き PAPR 装着時）

	体重測定
	前室 [†] 入室
	温度計, 心拍モニター, 呼吸用保護具装着
20分	安静時の測定
5分	実験室 [‡] に移動
30分	運動時の測定 (エルゴメーター VO2MAX 30%)
5分	前室 [†] に移動
20分	安静時の測定
	温度計, 心拍モニター, 呼吸用保護具取り外し
	体重測定
	†:気温28°C, 相対湿度45% (WBGT23°C)
	‡:気温36°C, 相対湿度45% (WBGT29°C)

図9 測定概要

6. 解析方法

それぞれの測定条件における直腸温，食道温，マスク内の温度（冷風装置を使用した際は装置内の吸気弁付近の温度），心拍数を集計した。直腸温と食道温は，測定開始0分目1分間の平均値を基準とした差分の集計も行った。また，実験前後の体重から，体重減少率を算出した。

7. 倫理的配慮

本研究は産業医科大学倫理委員会の承認を得ており，個人情報取り扱いおよび保管には万全の配慮を行った。対象者は本研究に参加することの利益と不利益とを説明された上で，参加または不参加を自由に選択できることを保証した。参加に同意を得られた対象者からは同意書を得た。

C. 研究結果

被験者別の直腸温の測定結果を図10に示す。全被験者の測定結果をまとめたものを図11に示す。被験者別の直腸温差分の測定結果を図12に示す。全被験者の測定結果をまとめたものを図13に示す。被験者別の食道温の測定結果を図14に示す。全被験者の測定結果をまとめたものを図15に示す。被験者別の食道温差分の測定結果を図16に示す。全被験者の測定結果をまとめたものを図17に示す。被験者別のマスク内温度の測定結果を図18に示す。全被験者の測定結果をまとめたものを図19に示す。被験者別の心拍数の測定結果を図20に示す。全被験者の測定結果をまとめたものを図21に示す。それぞれの測定条件における体重減少率を図22に示す。

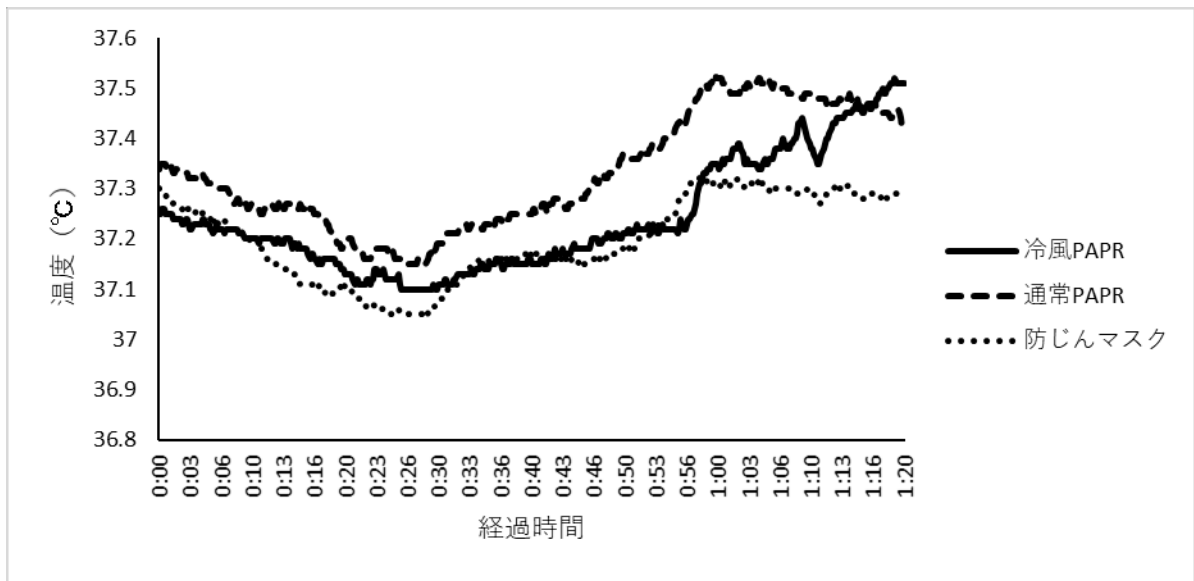


図 10-1 被験者 A の直腸温

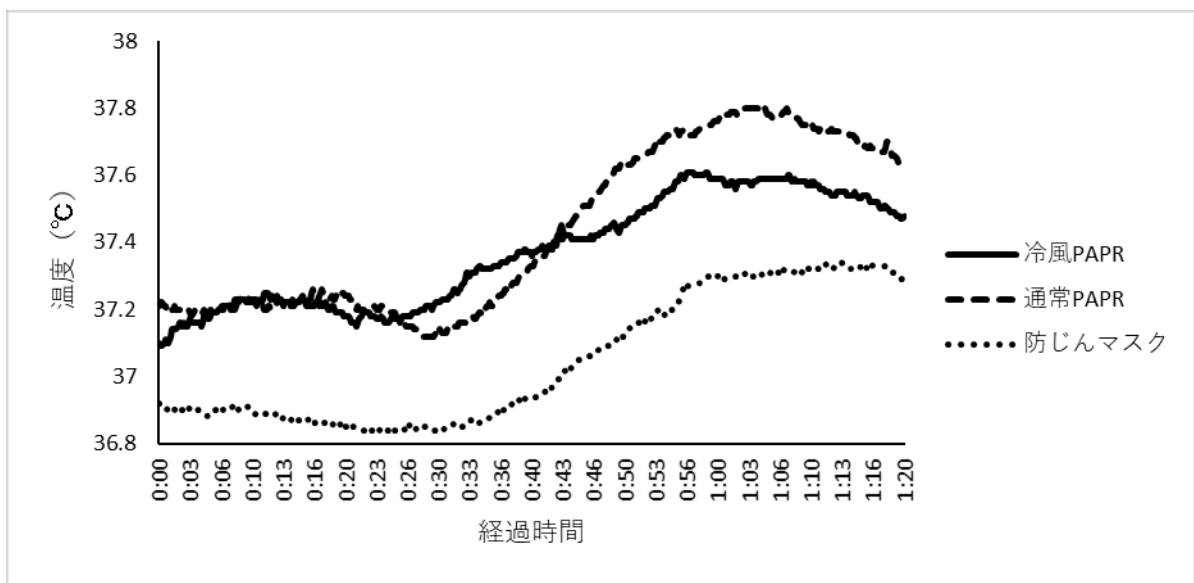


図 10-2 被験者 B の直腸温

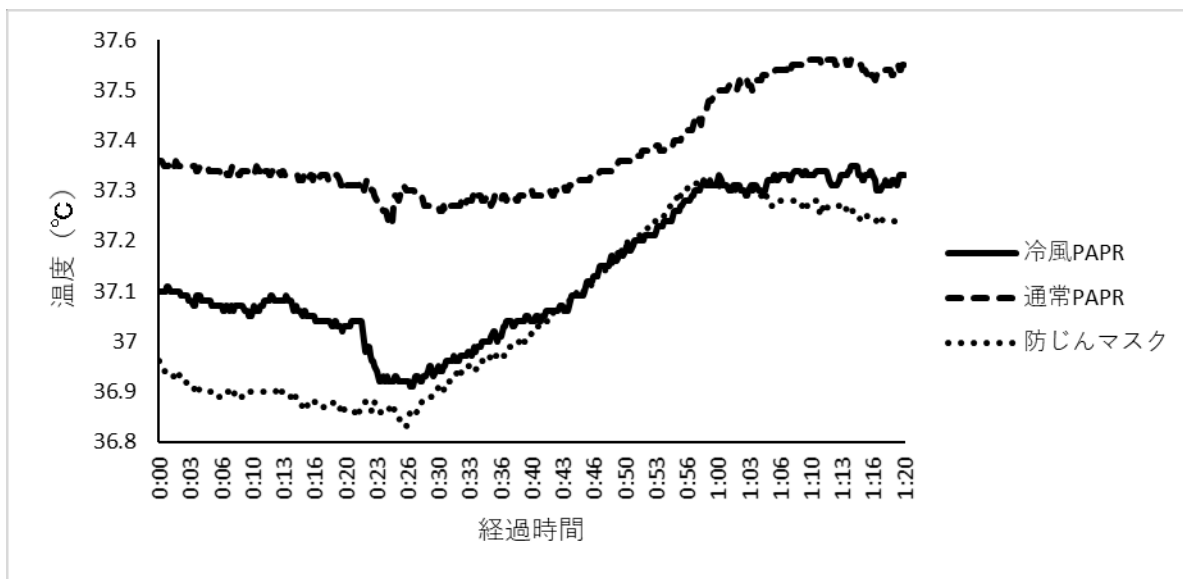


図 10-3 被験者 C の直腸温

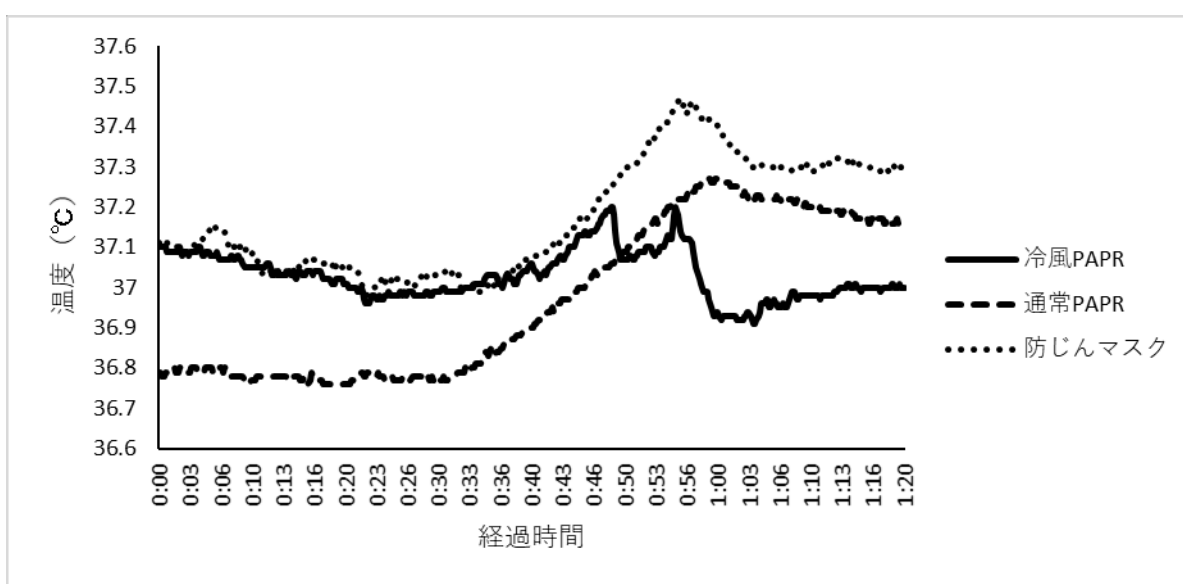


図 10-4 被験者 D の直腸温

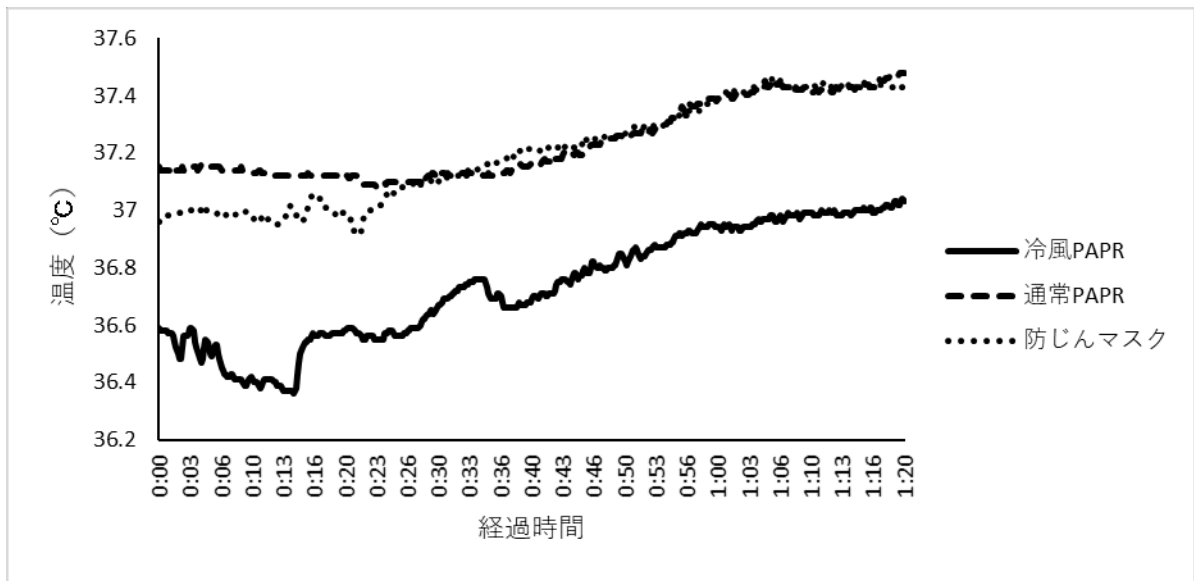


図 10-5 被験者 E の直腸温

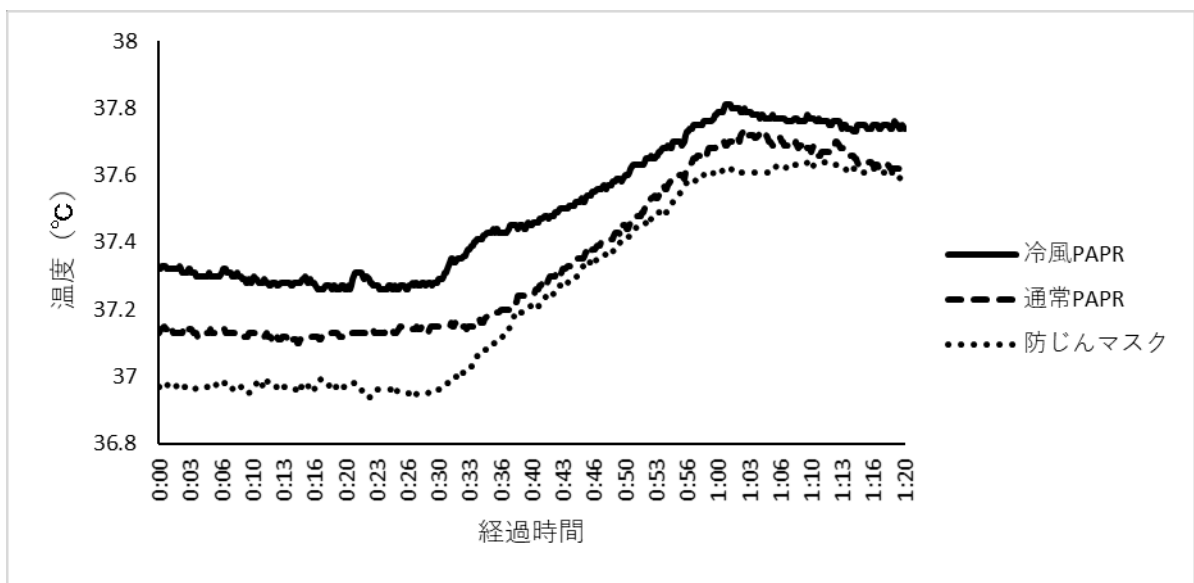


図 10-6 被験者 F の直腸温

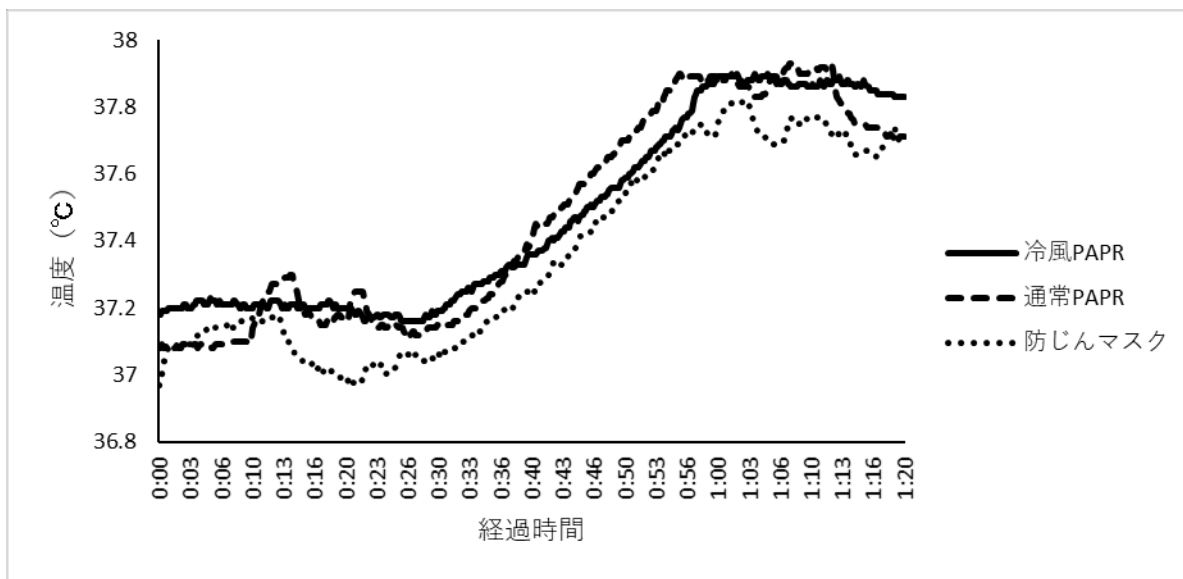


図 10-7 被験者 G の直腸温

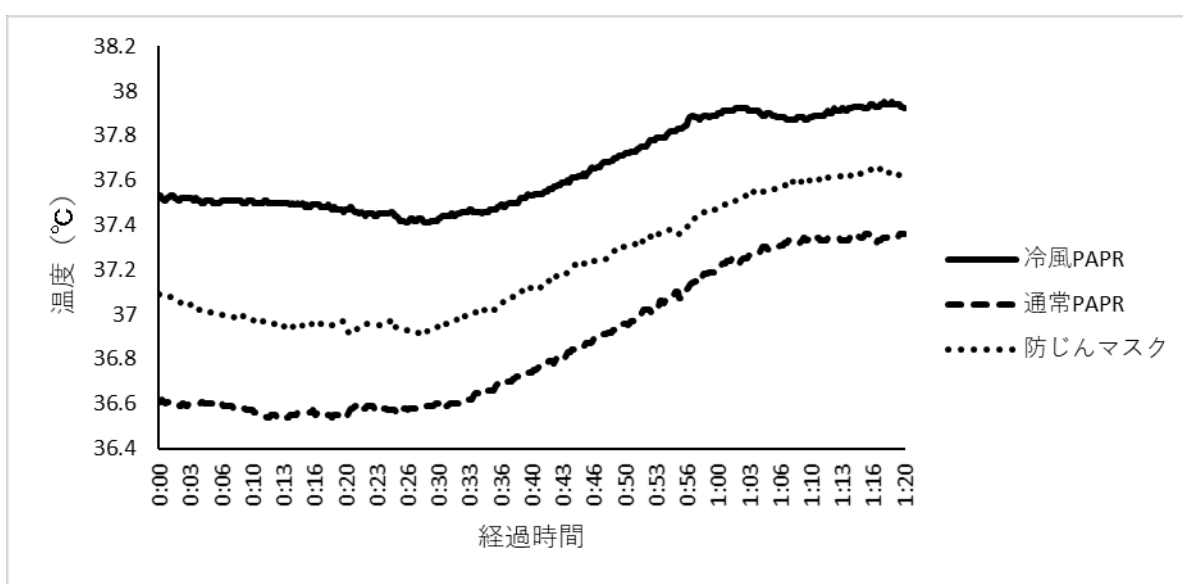


図 10-8 被験者 H の直腸温

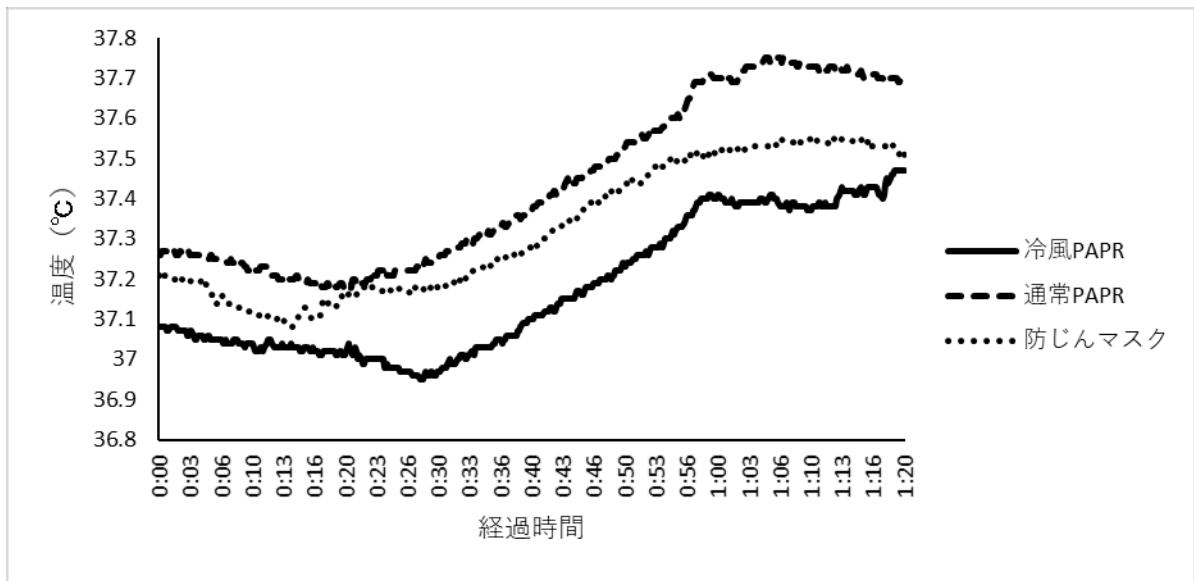


図 10-9 被験者 I の直腸温

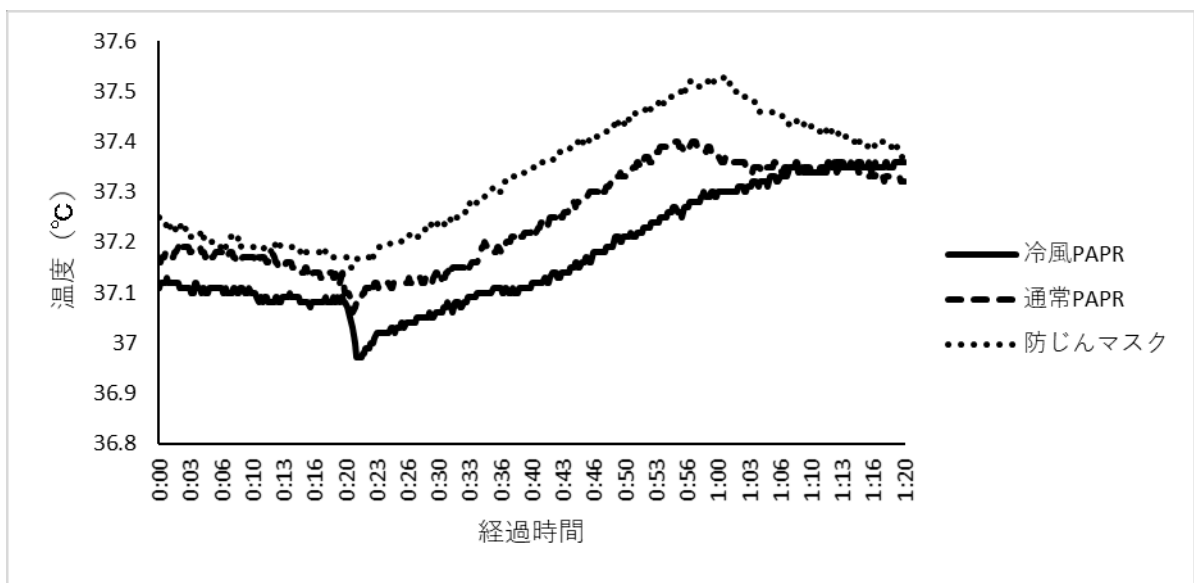


図 10-10 被験者 J の直腸温

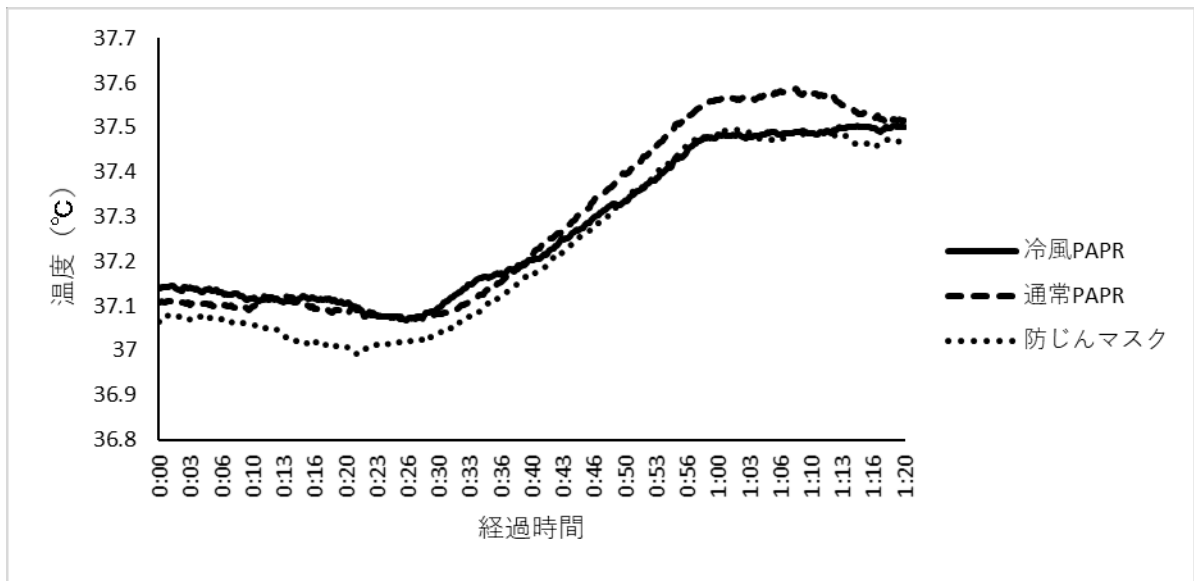


図 11 全被験者の直腸温

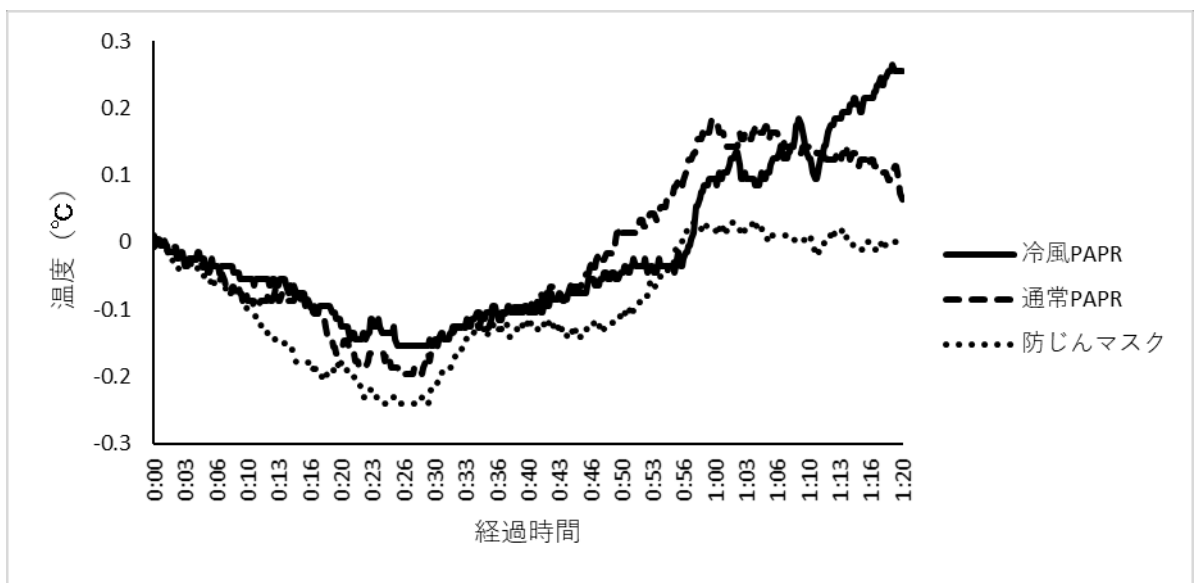


図 12-1 被験者 A の直腸温差分

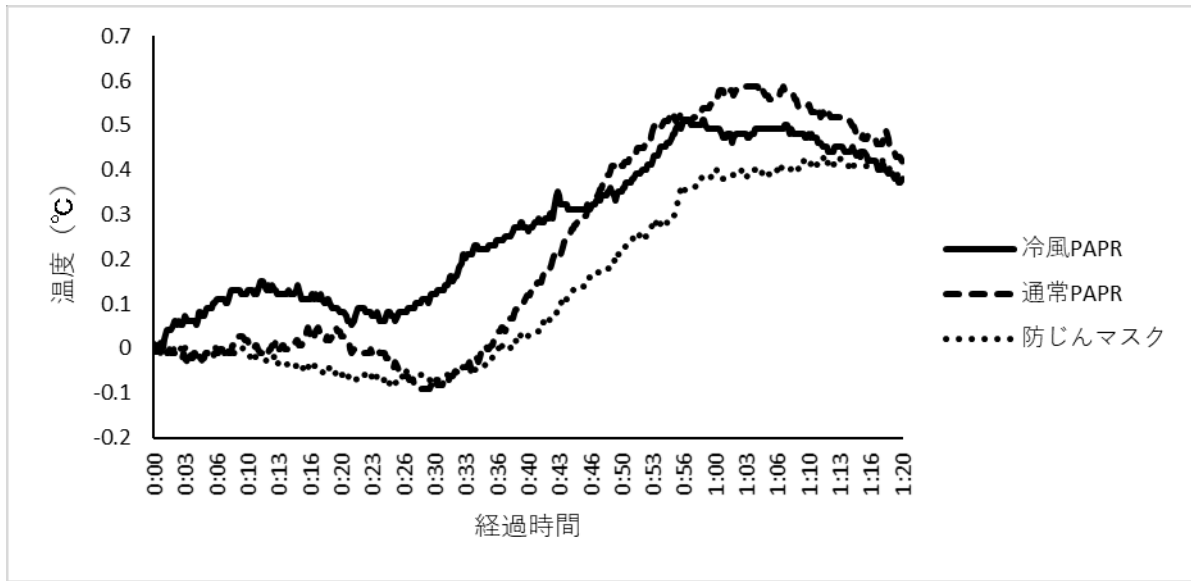


図 12-2 被験者 B の直腸温差分

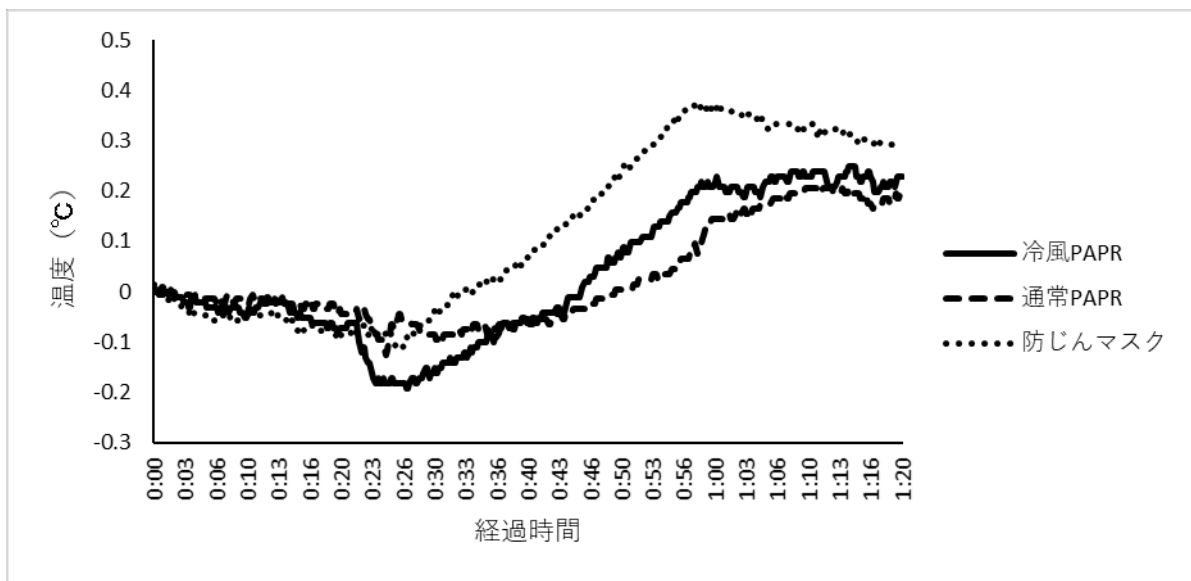


図 12-3 被験者 C の直腸温差分

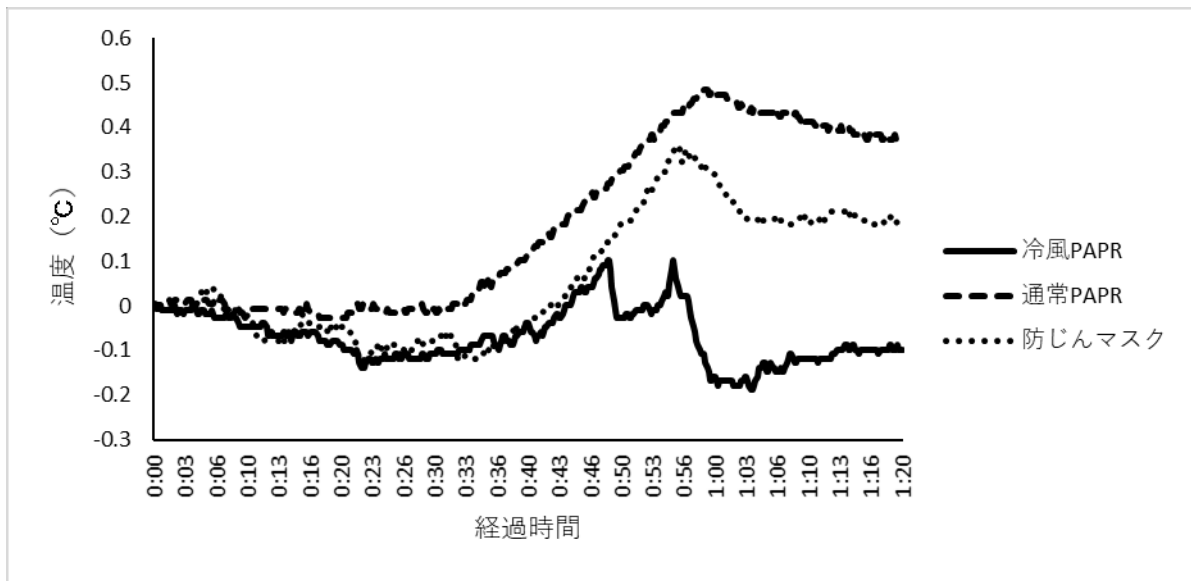


図 12-4 被験者 D の直腸温差分

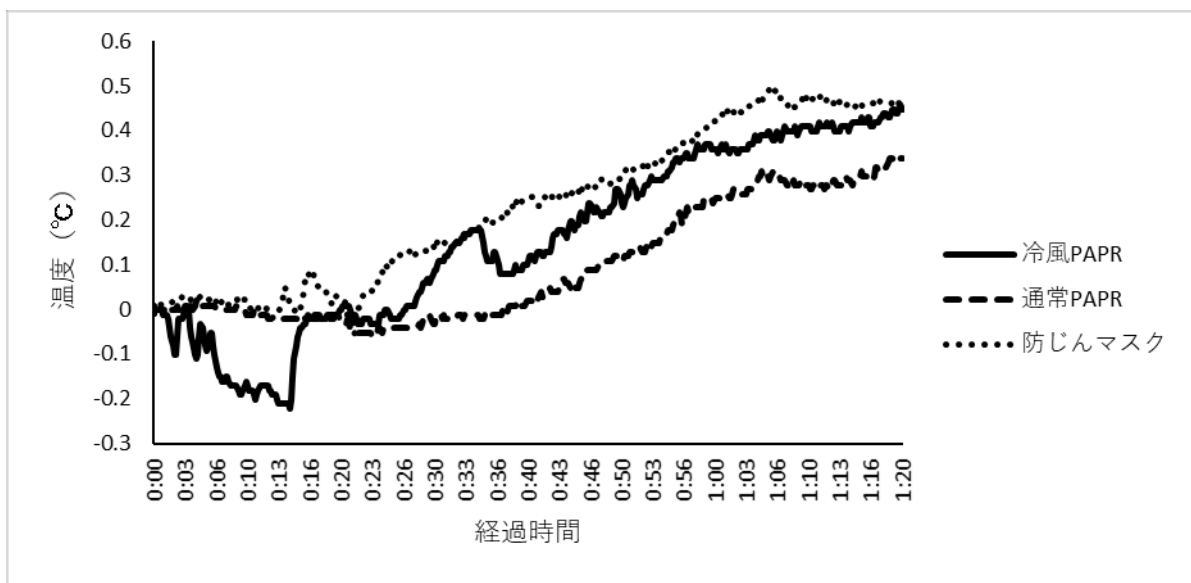


図 12-5 被験者 E の直腸温差分

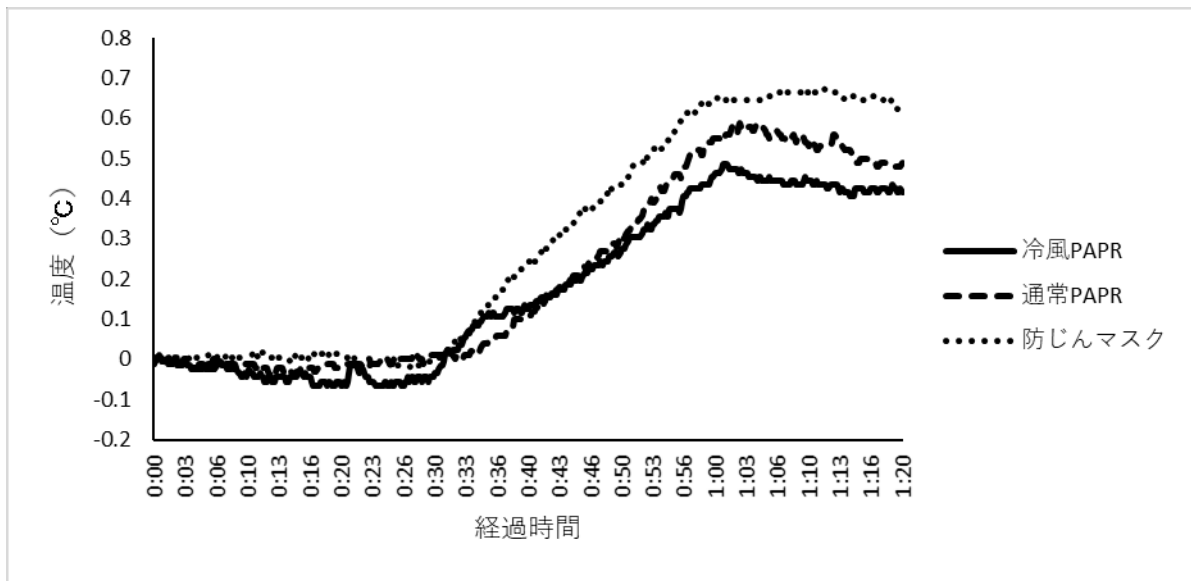


図 12-6 被験者 F の直腸温差分

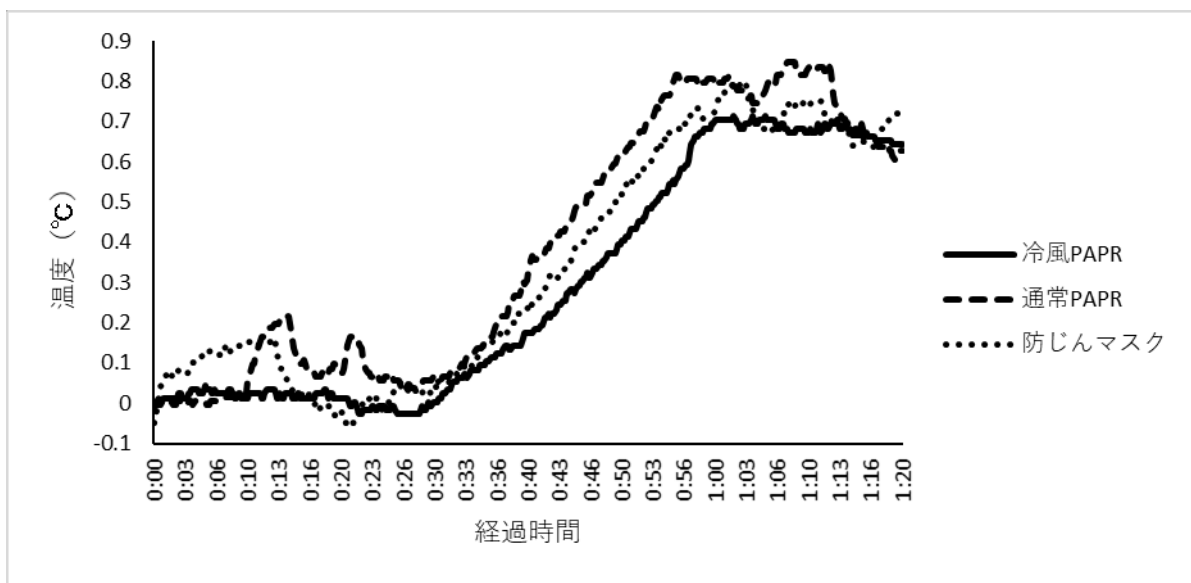


図 12-7 被験者 G の直腸温差分

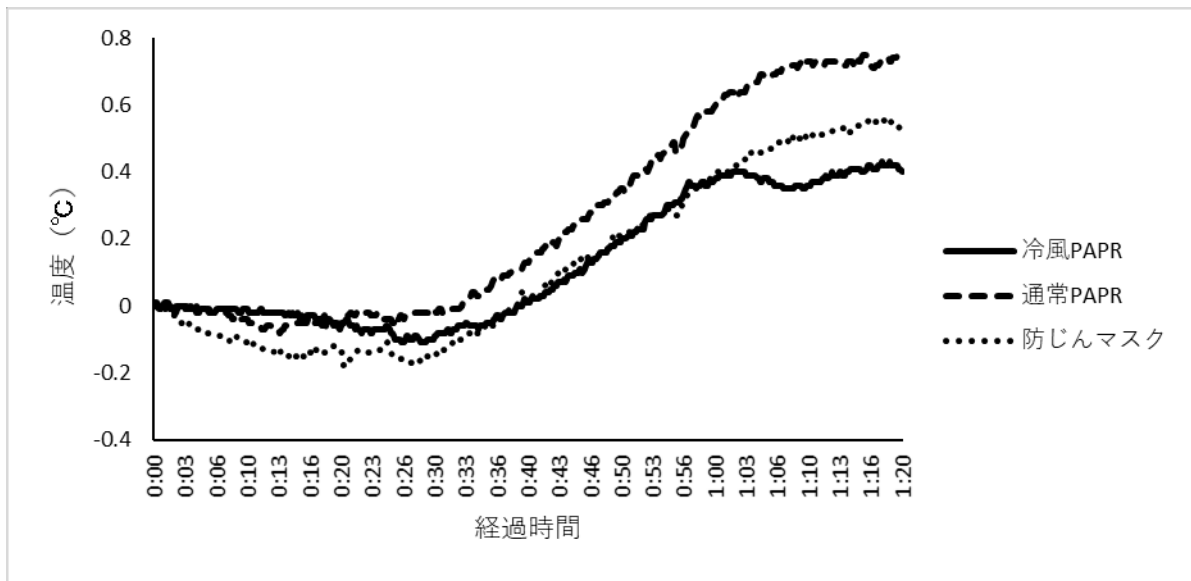


図 12-8 被験者 H の直腸温差分

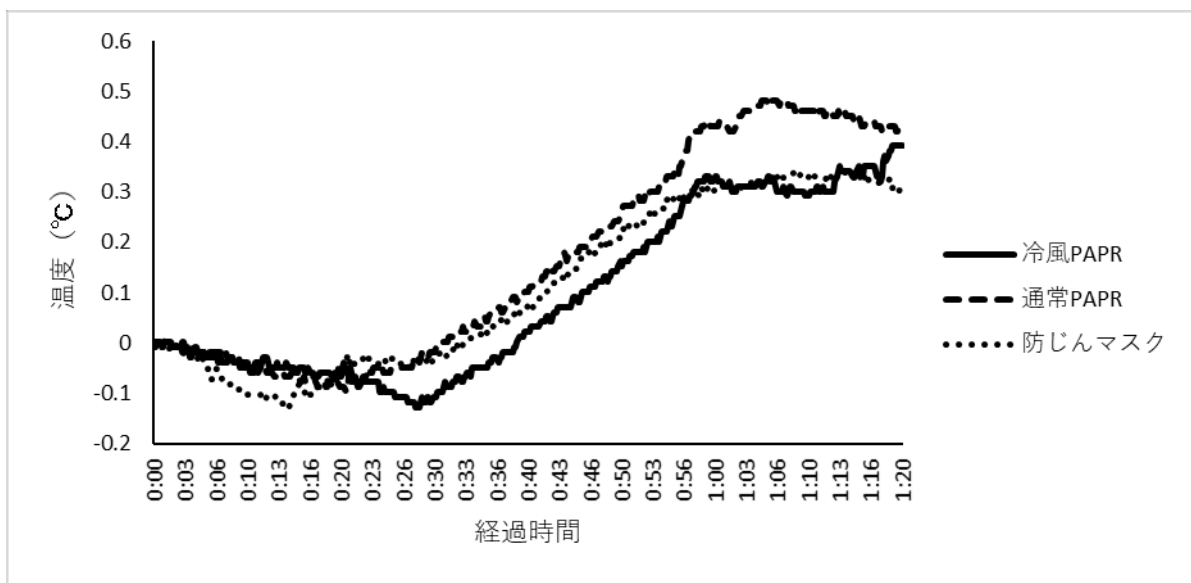


図 12-9 被験者 I の直腸温差分

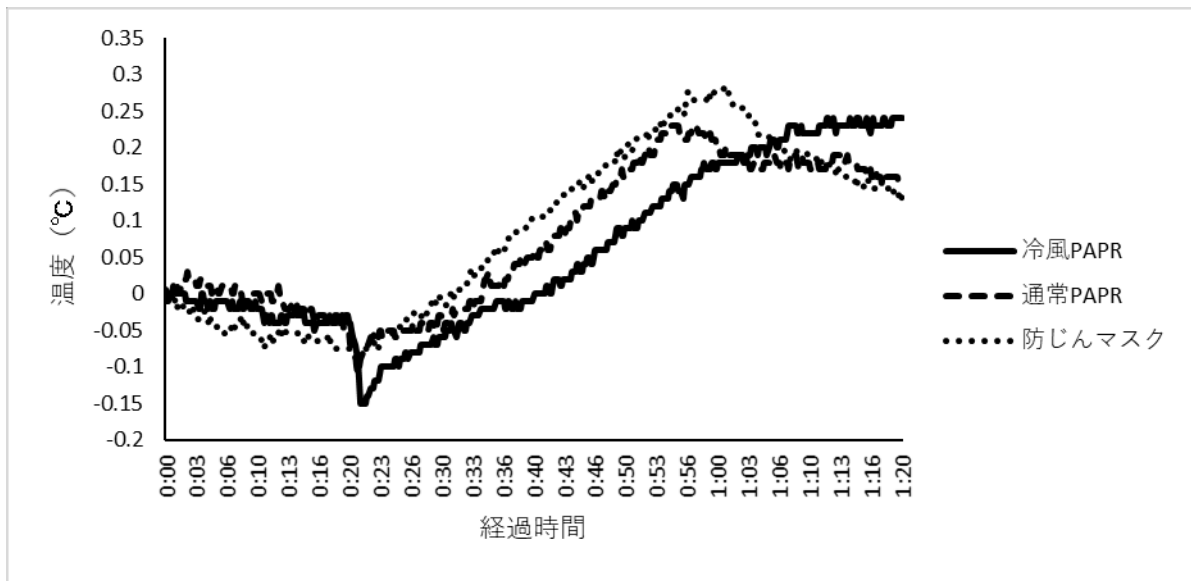


図 12-10 被験者 J の直腸温差分

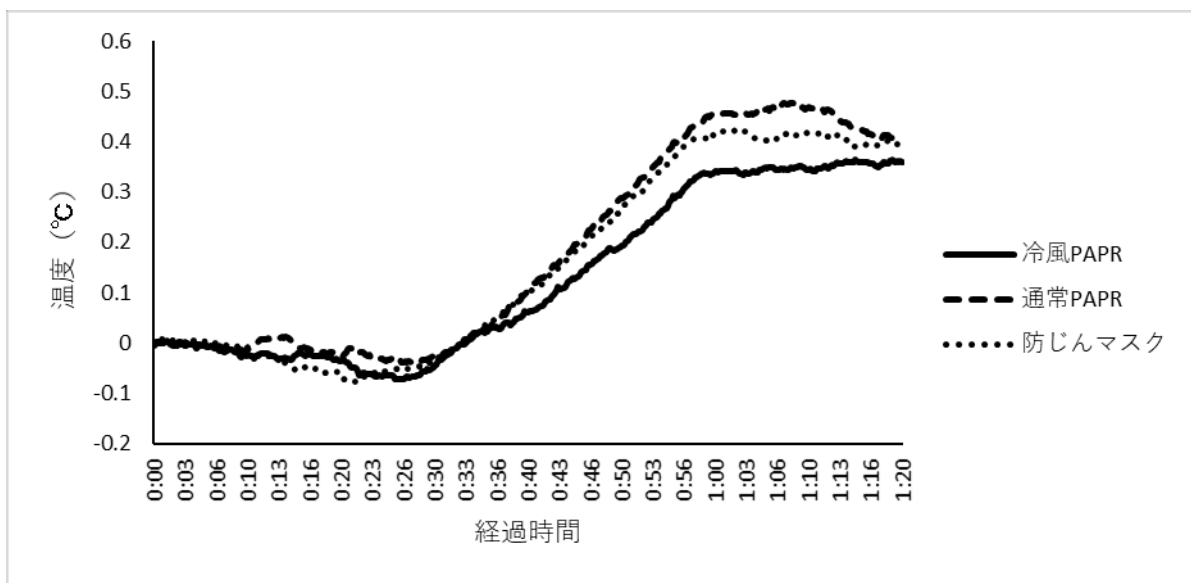


図 13 全被験者の直腸温差分

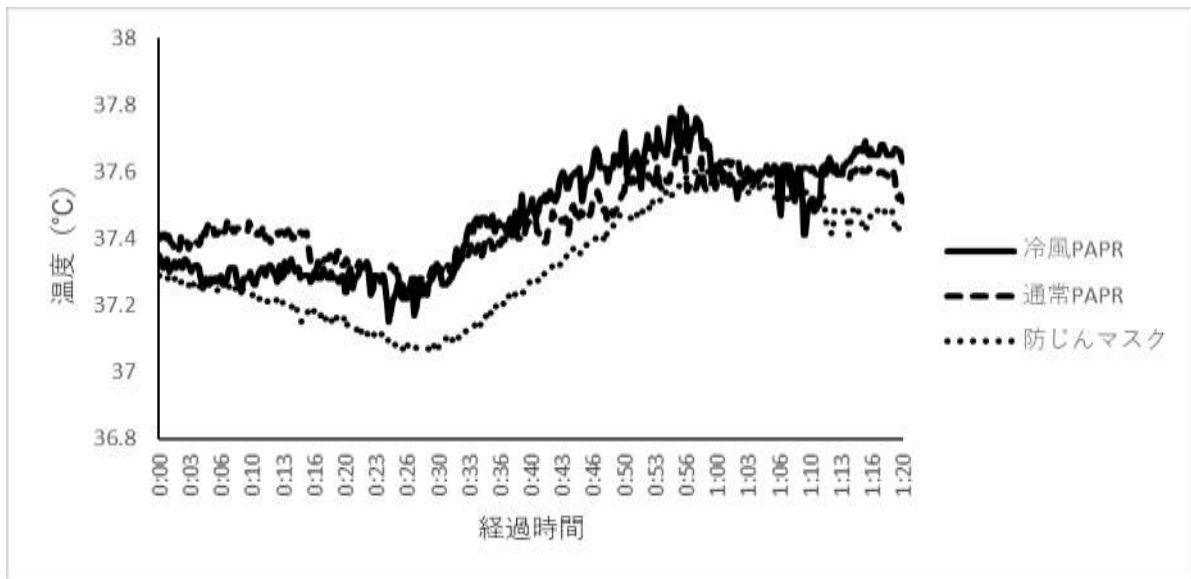


図 14-1 被験者 A の食道温

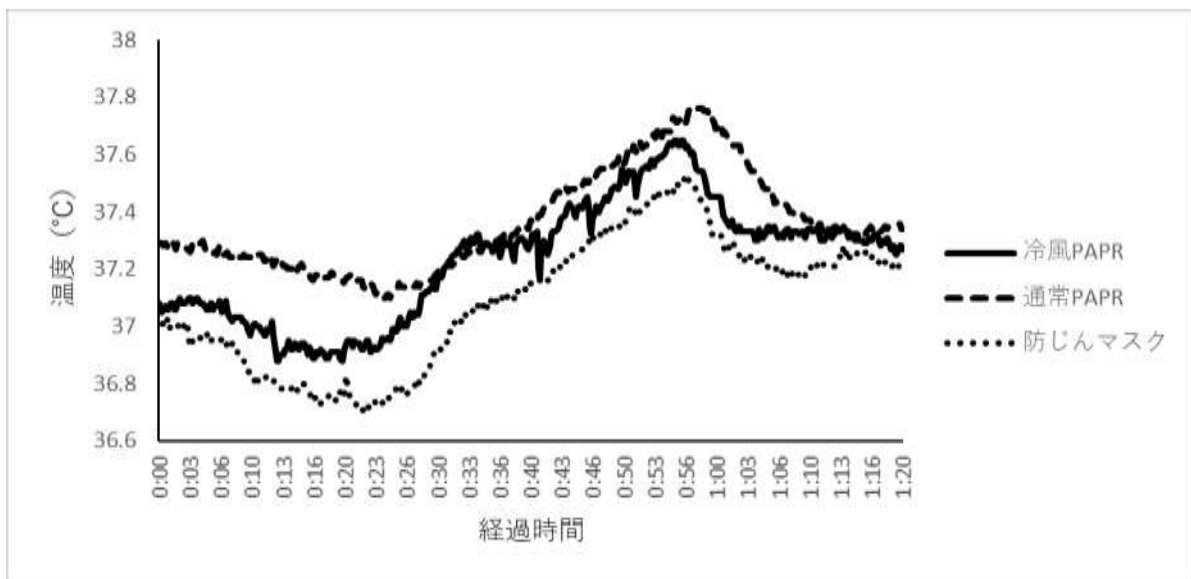


図 14-2 被験者 B の食道温

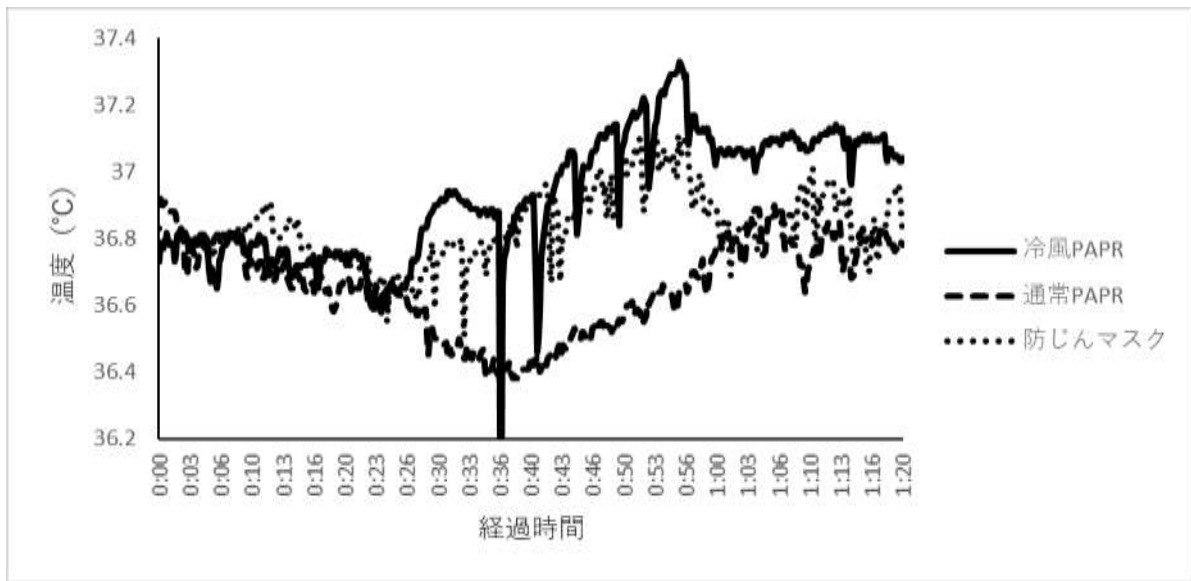


図 14-3 被験者 C の食道温

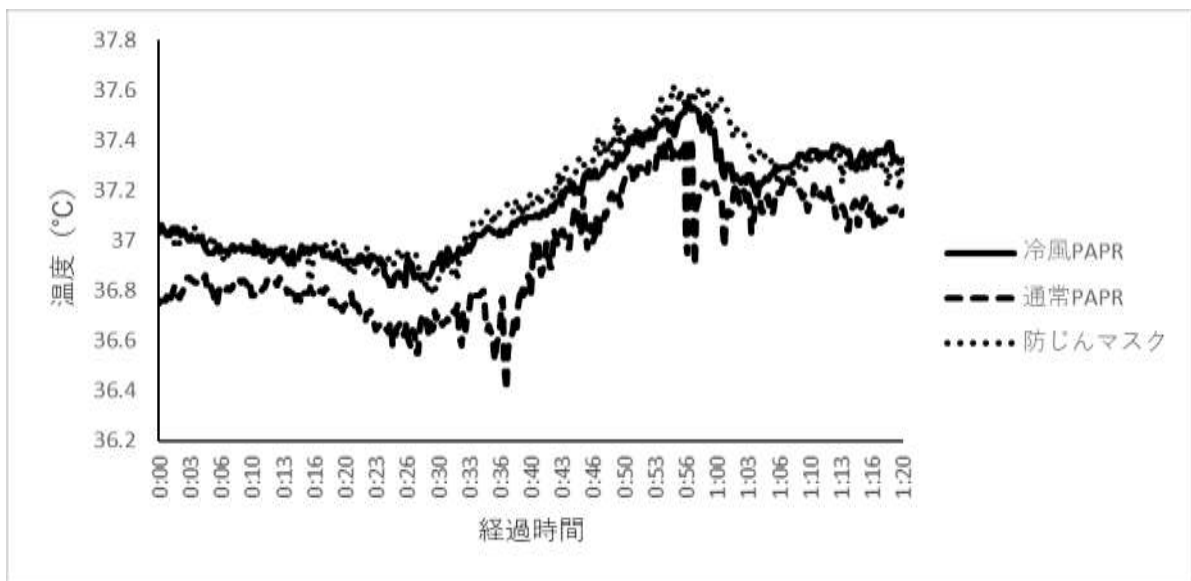


図 14-4 被験者 D の食道温

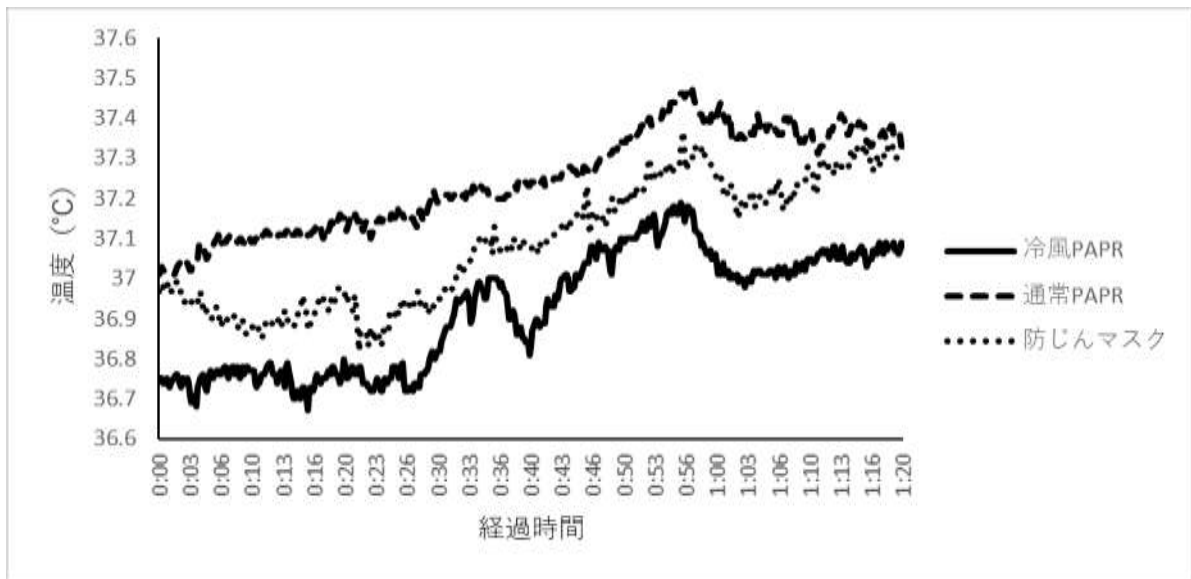


図 14-5 被験者 E の食道温

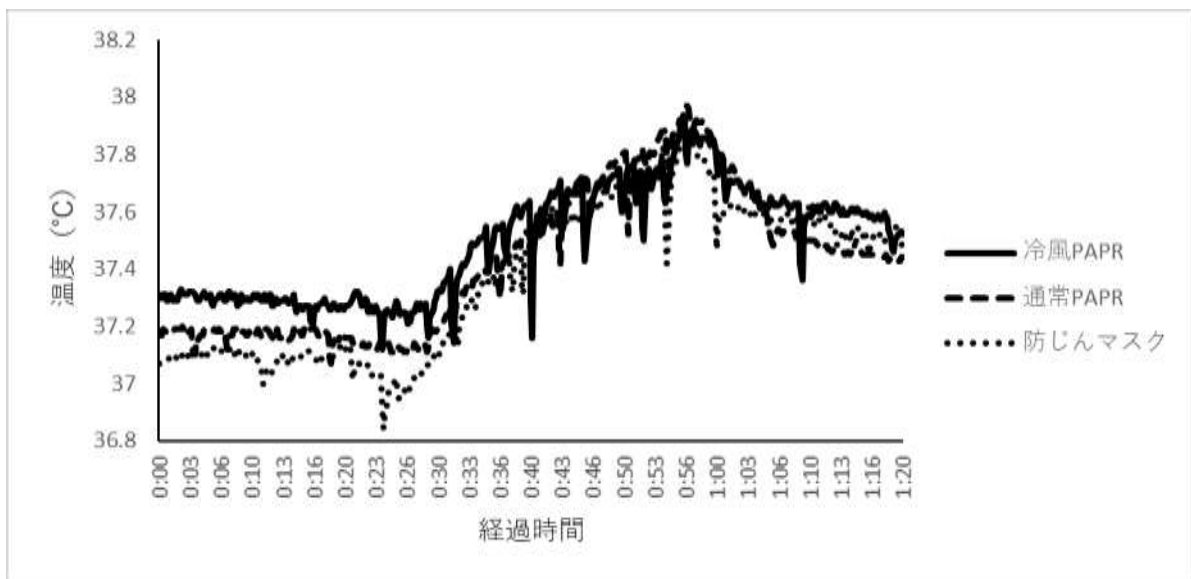


図 14-6 被験者 F の食道温

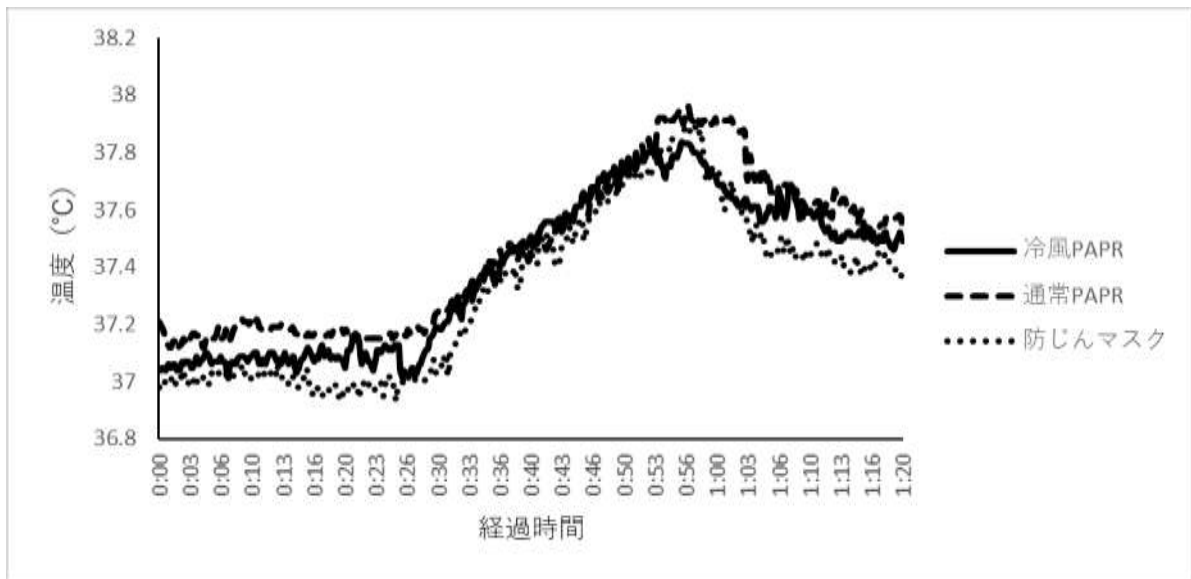


図 14-7 被験者 G の食道温

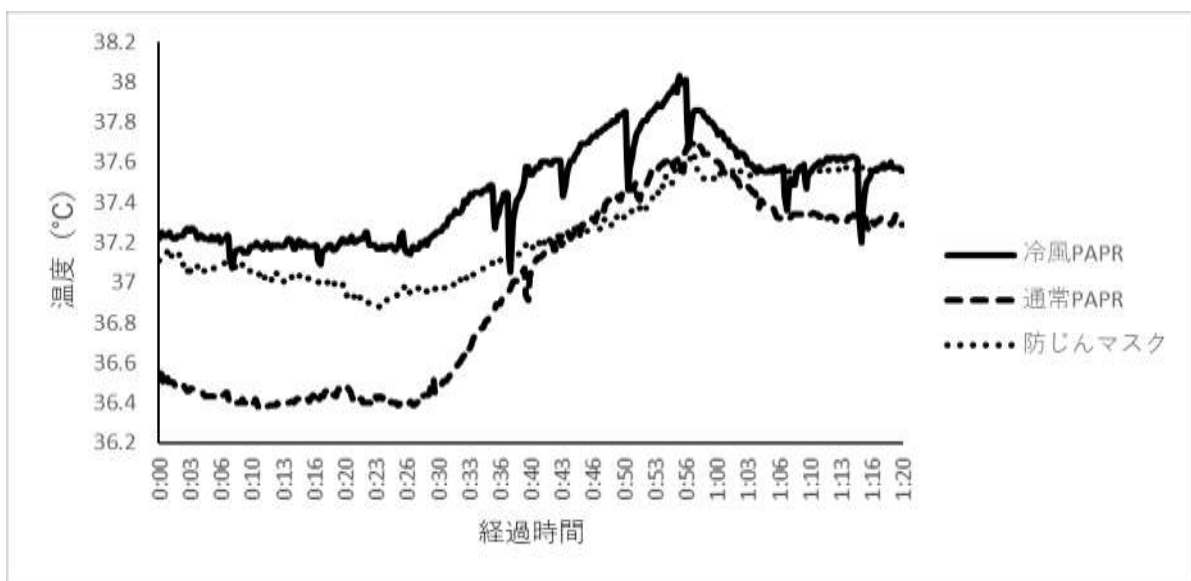


図 14-8 被験者 H の食道温

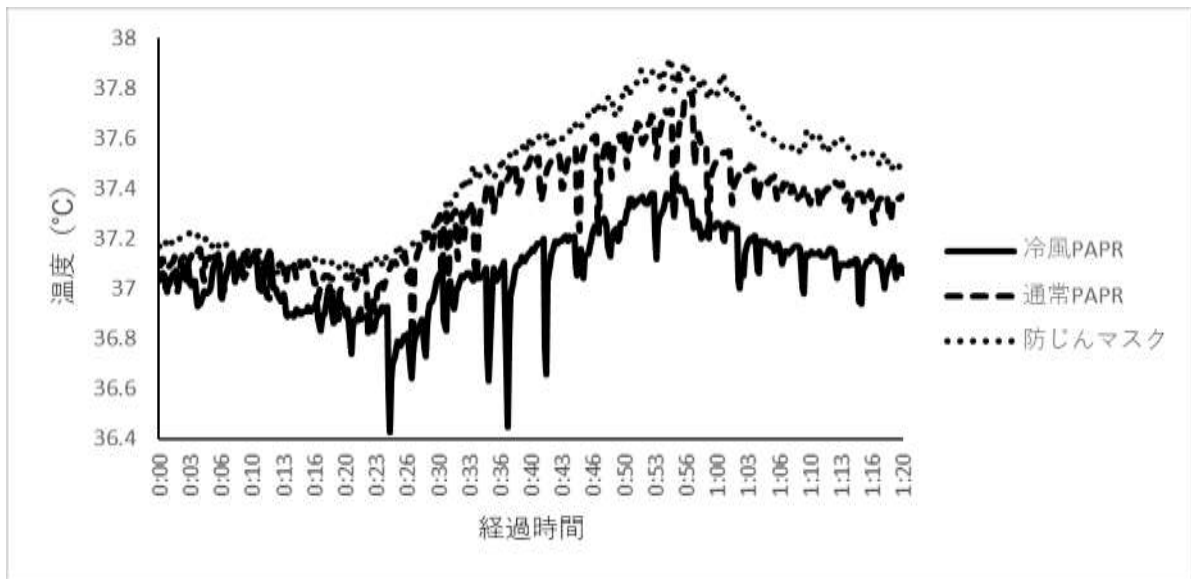


図 14-9 被験者 I の食道温

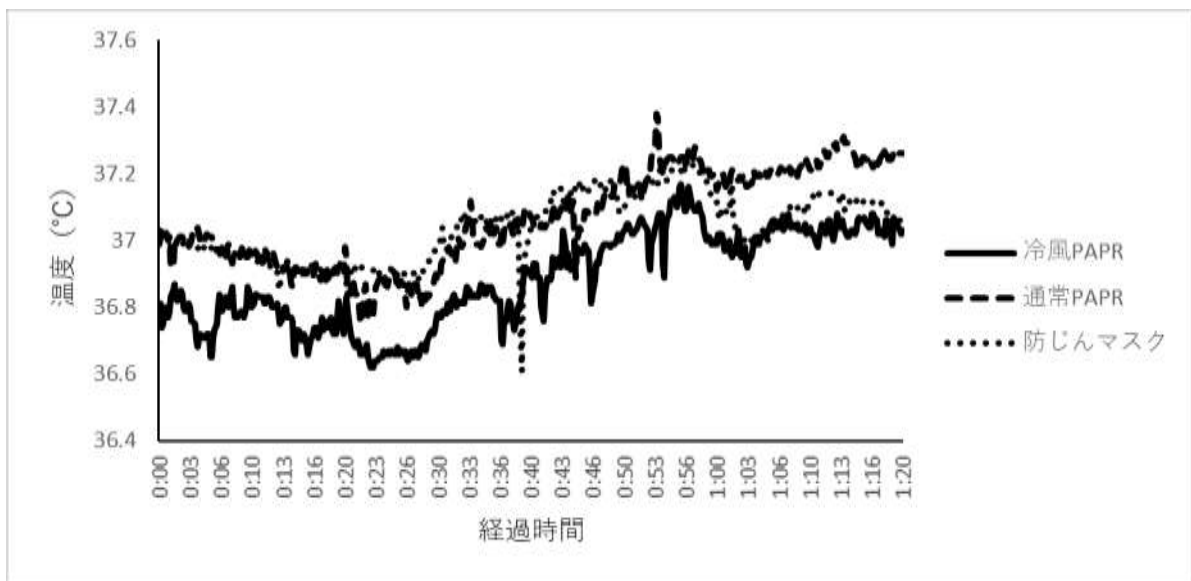


図 14-10 被験者 J の食道温

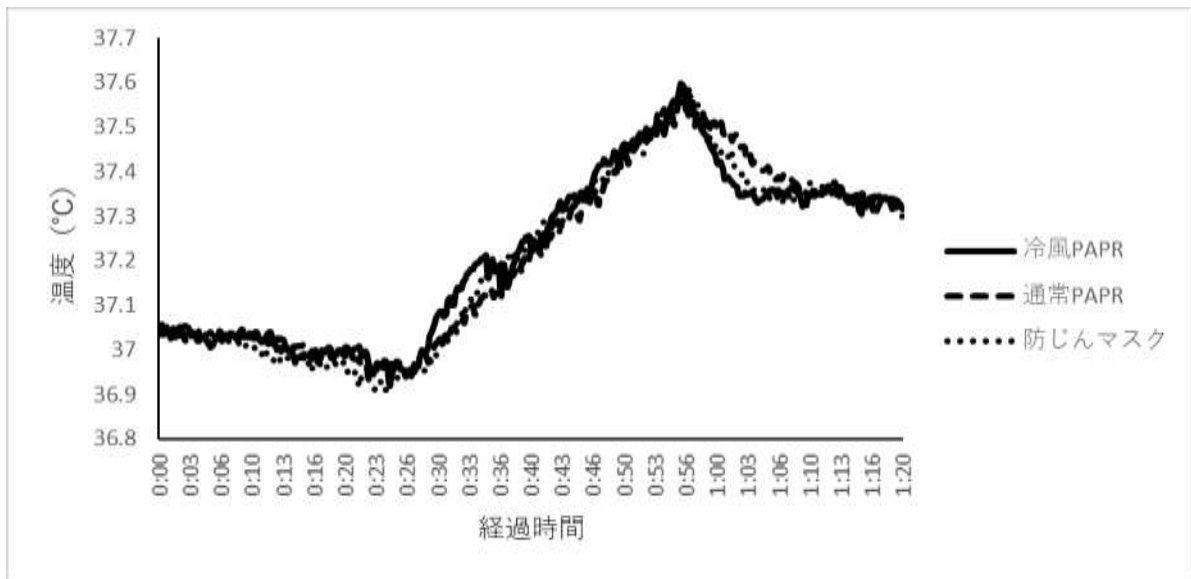


図 15 全被験者の食道温

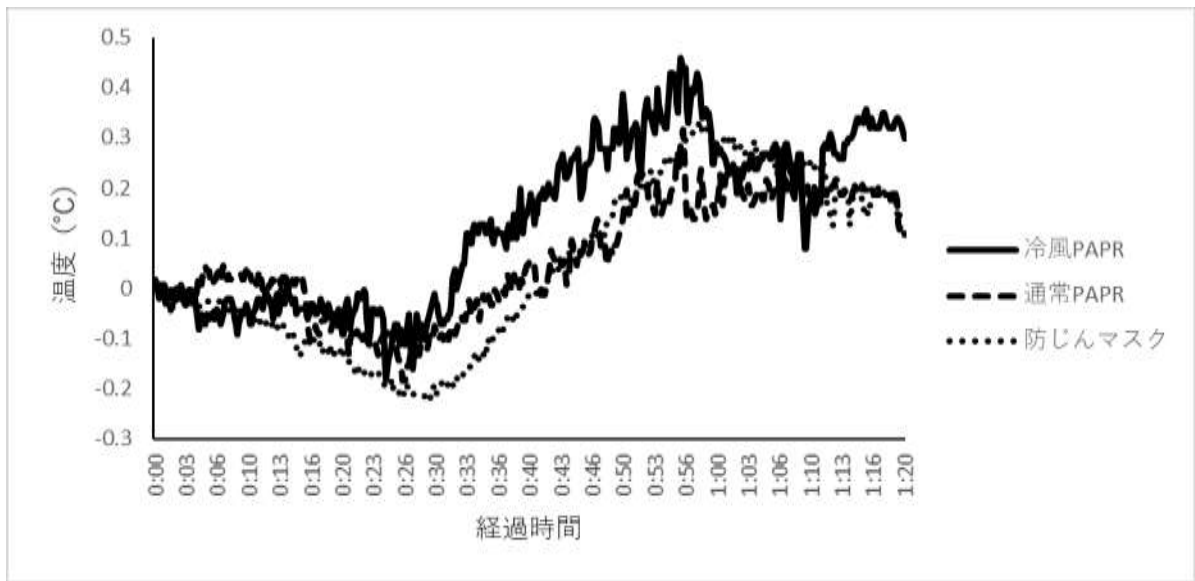


図 16-1 被験者 A の食道温差分

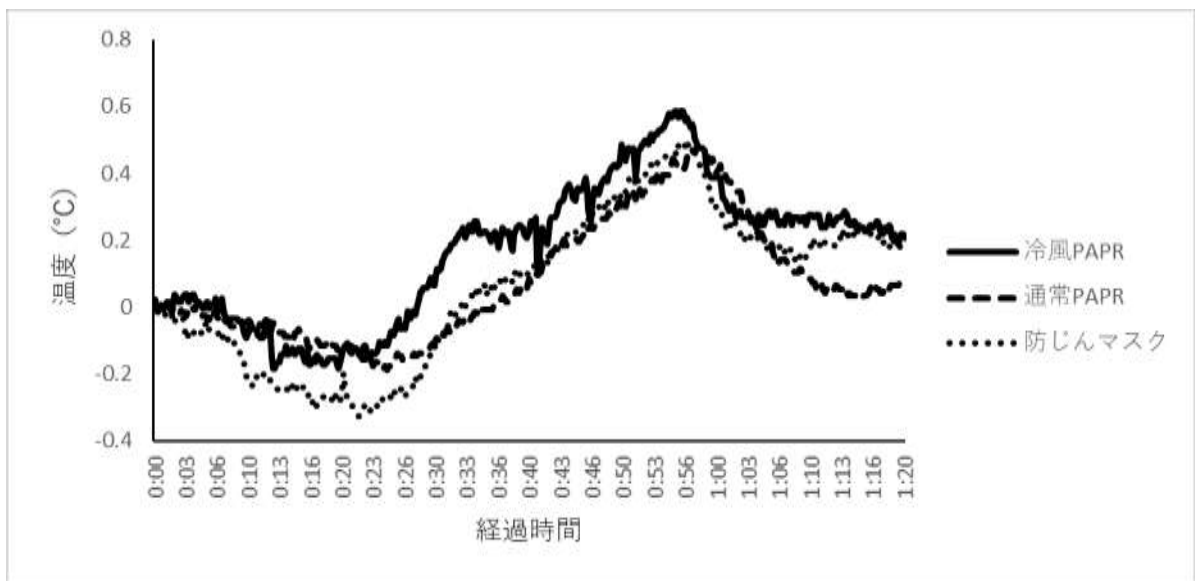


図 16-2 被験者 B の食道温差分

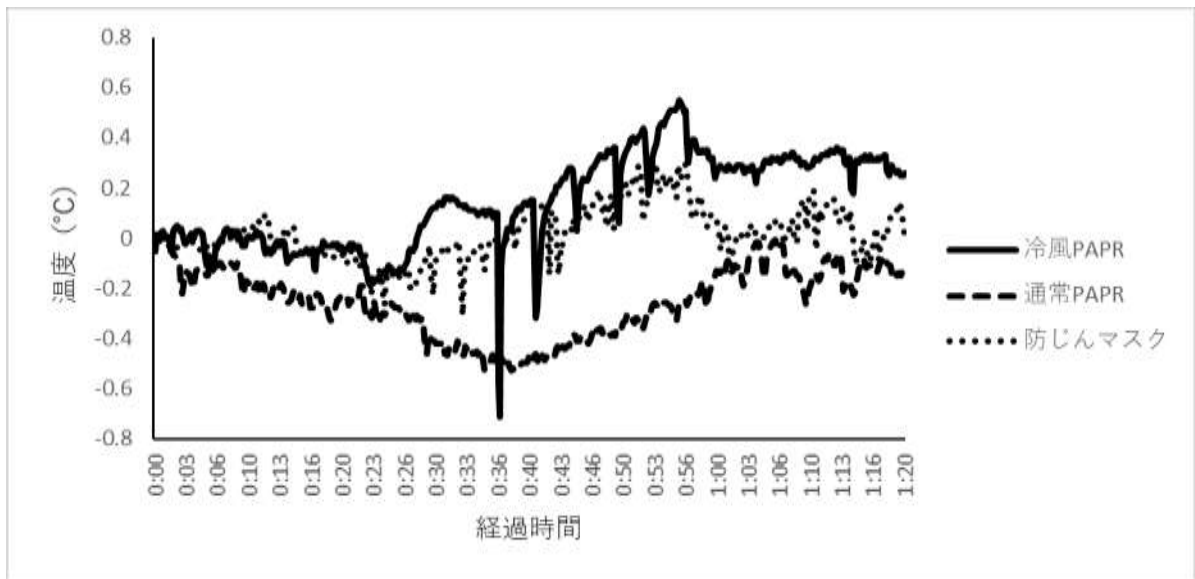


図 16-3 被験者 C の食道温差分

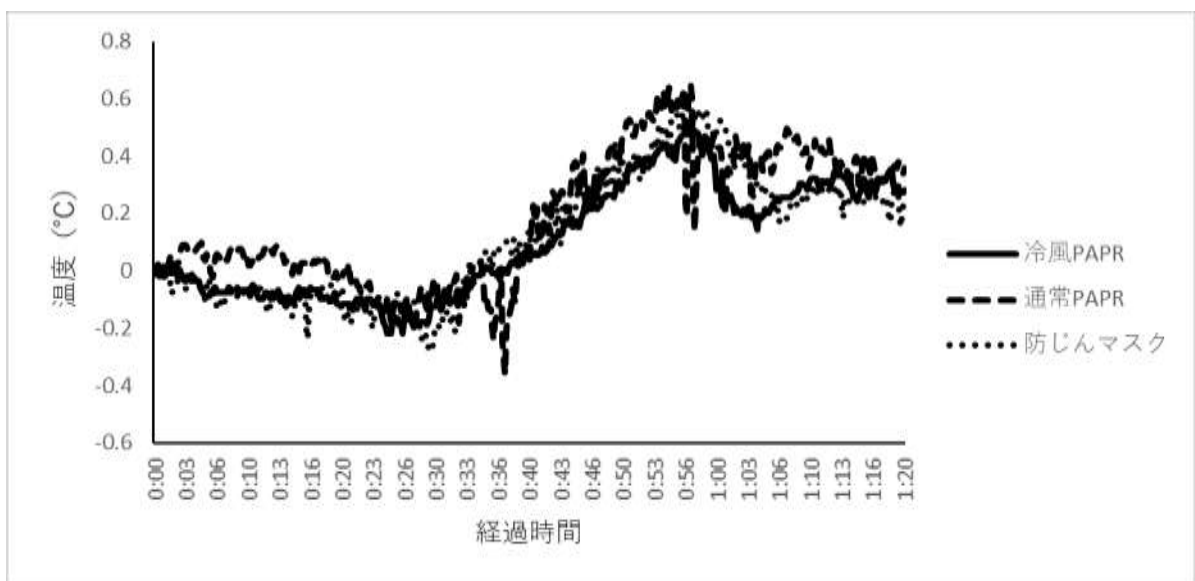


図 16-4 被験者 D の食道温差分

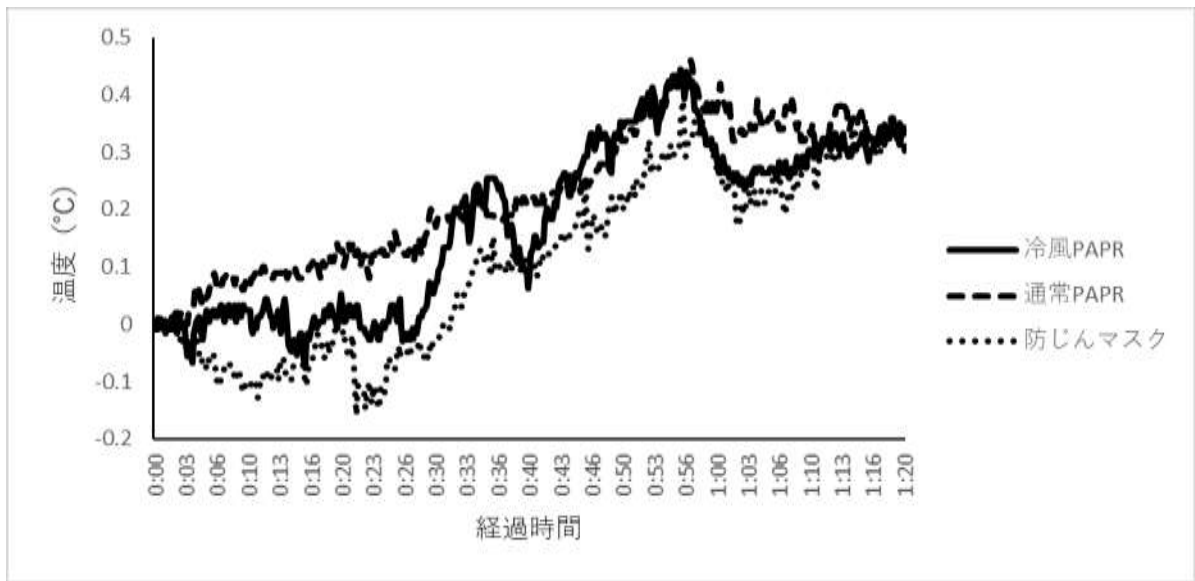


図 16-5 被験者 E の食道温差分

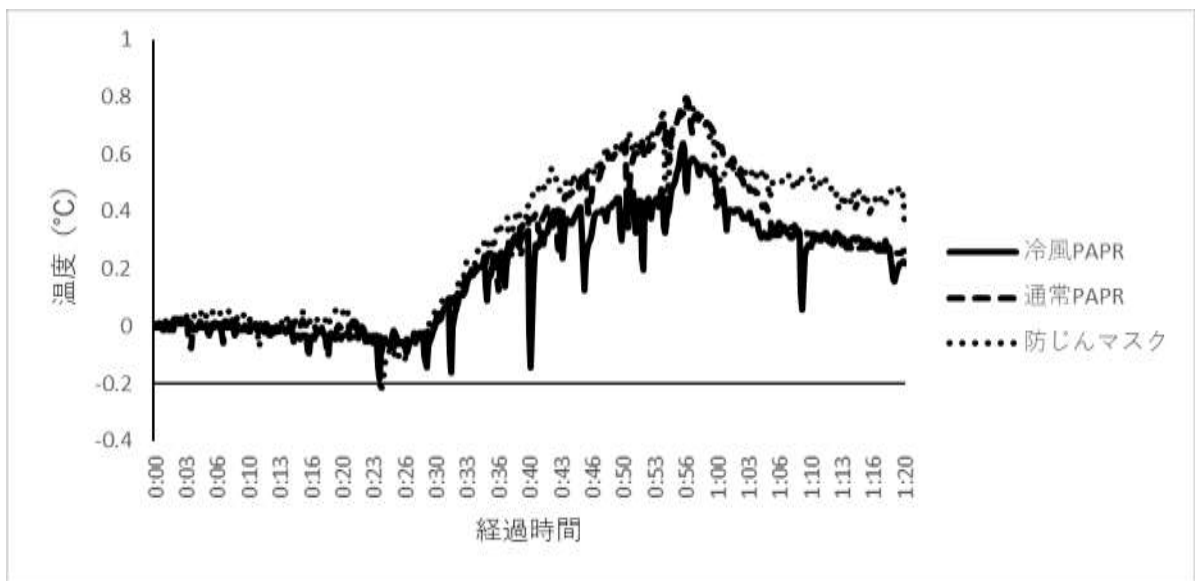


図 16-6 被験者 F の食道温差分

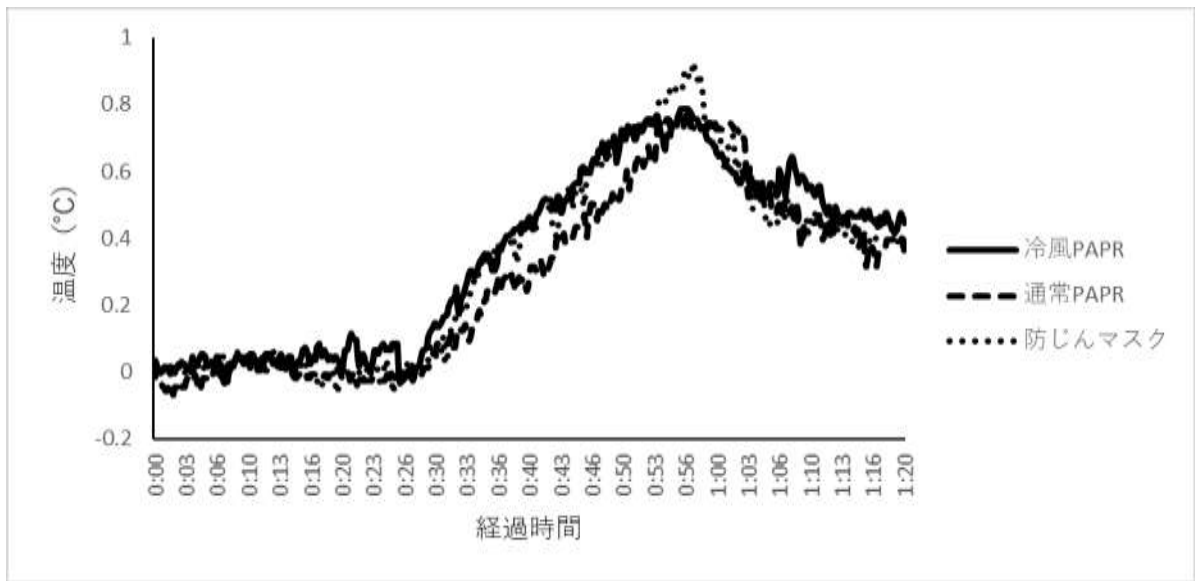


図 16-7 被験者 G の食道温差分

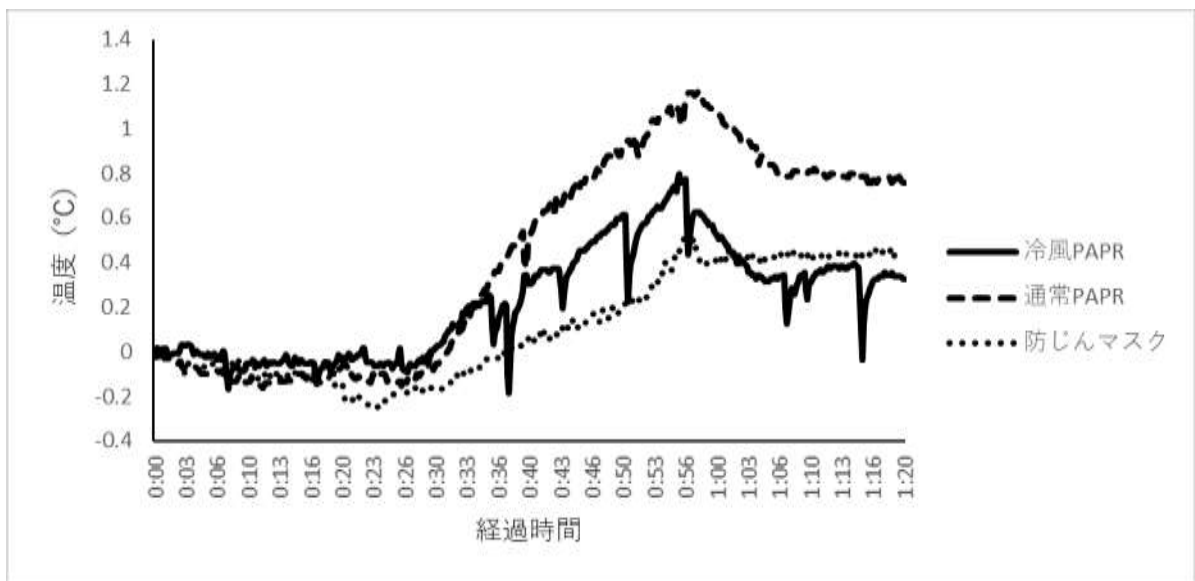


図 16-8 被験者 H の食道温差分

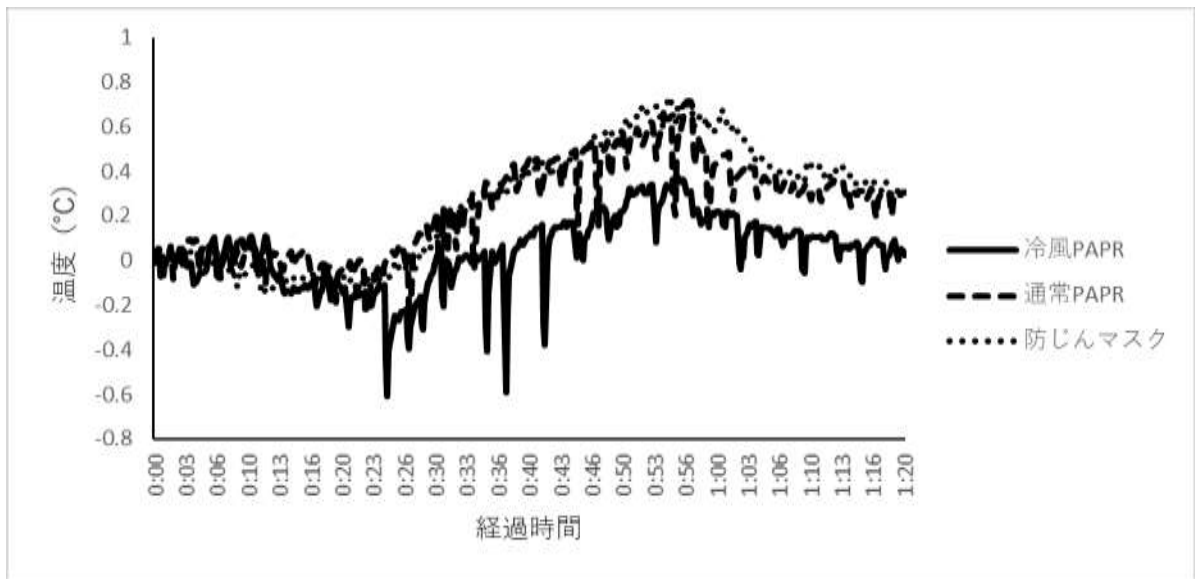


図 16-9 被験者 I の食道温差分

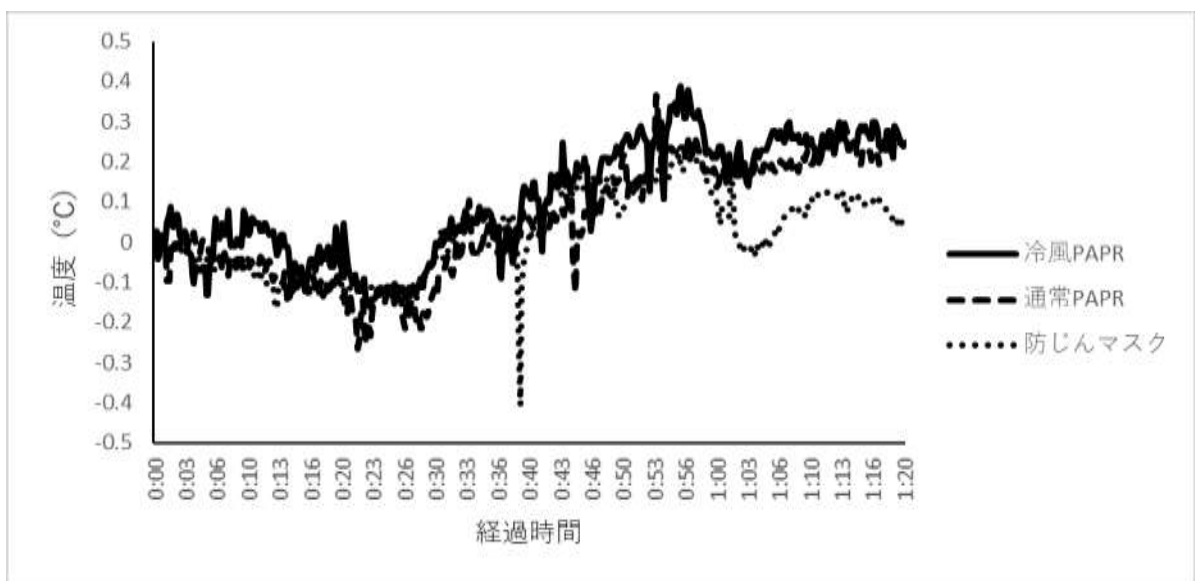


図 16-10 被験者 J の食道温差分

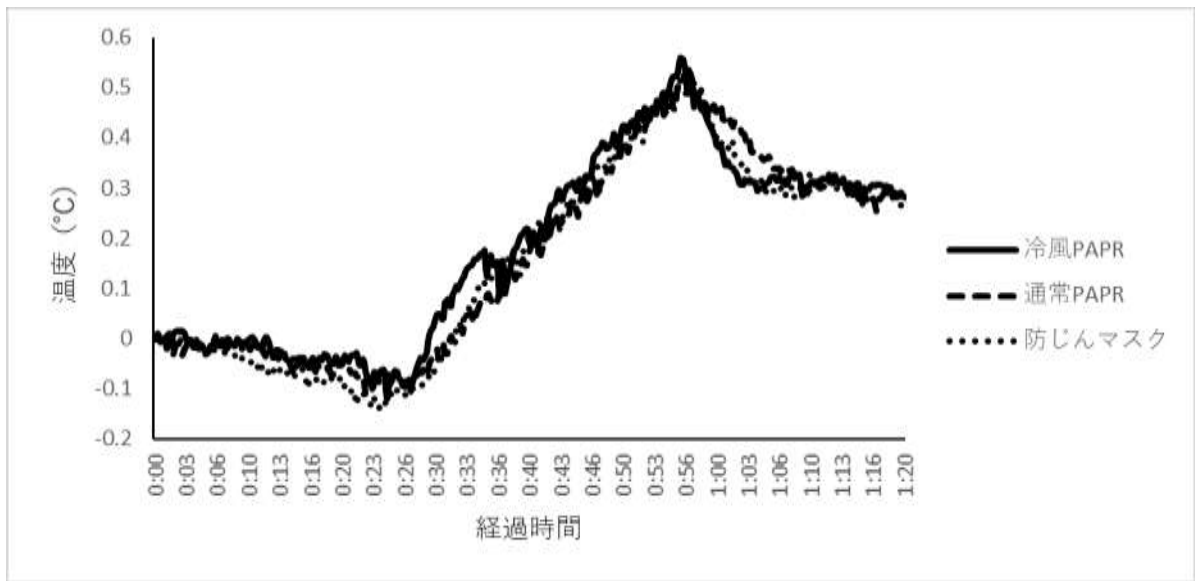


図 17 全被験者の食道温差分

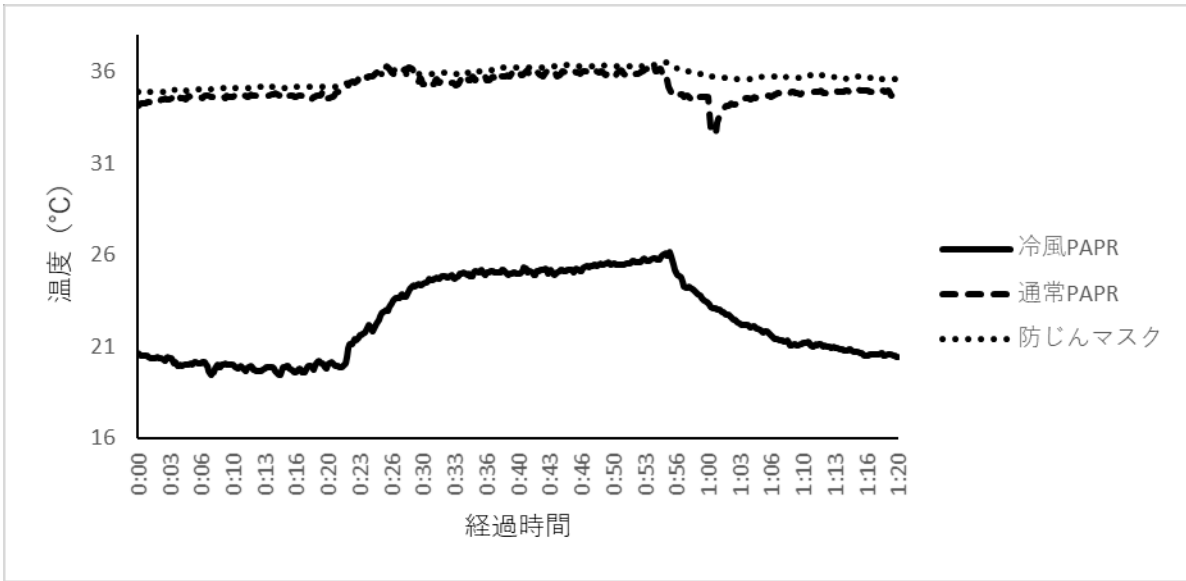


図 18-1 被験者 A のマスク内温度

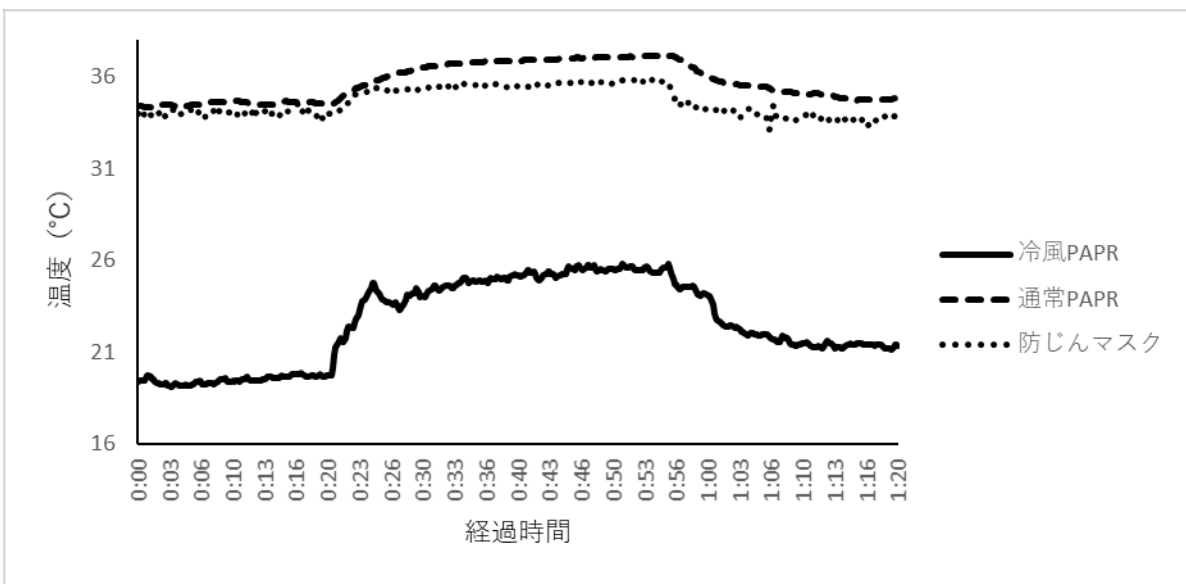


図 18-2 被験者 B のマスク内温度

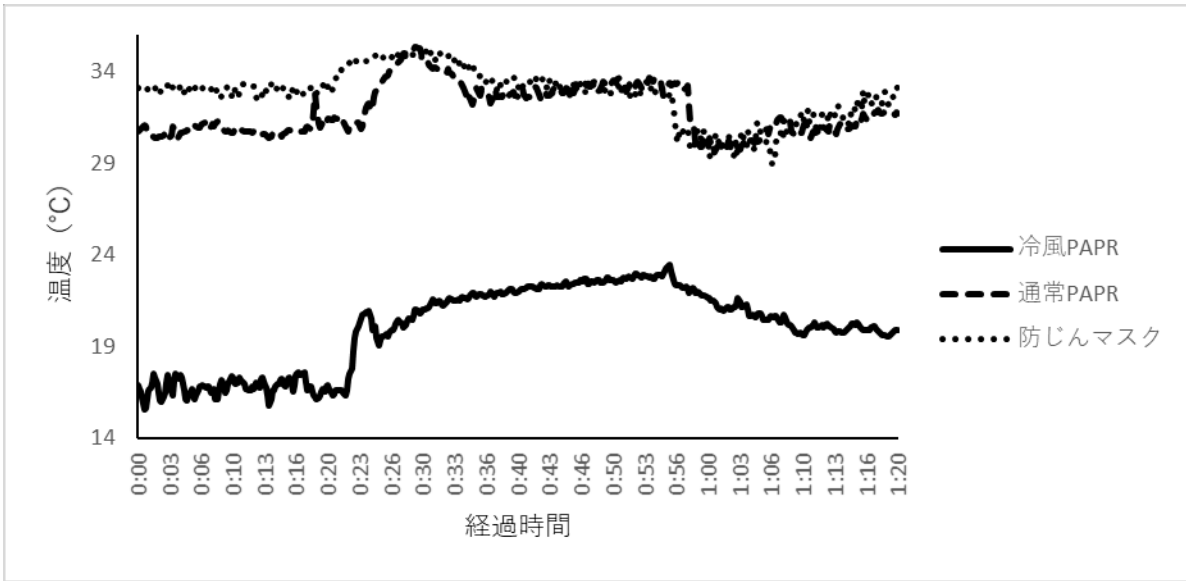


図 18-3 被験者 C のマスク内温度

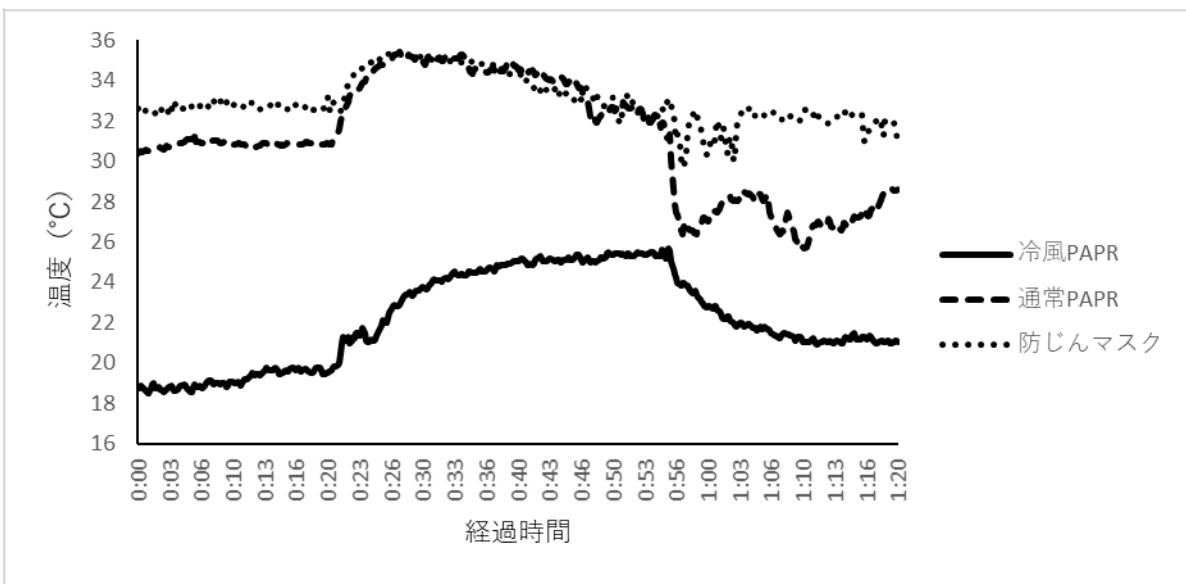


図 18-4 被験者 D のマスク内温度

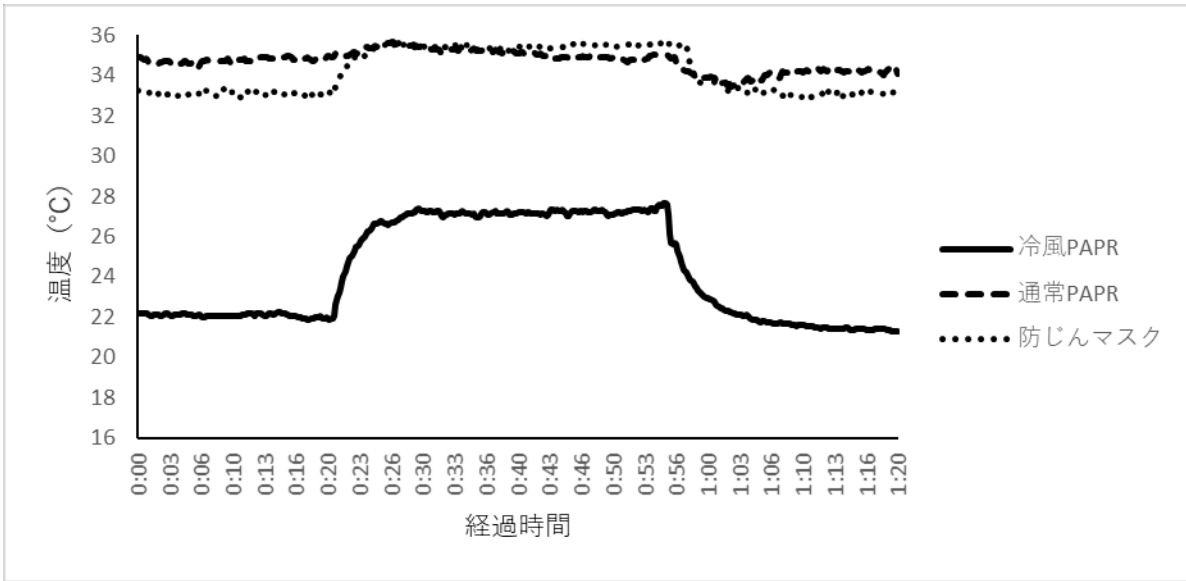


図 18-5 被験者 E のマスク内温度

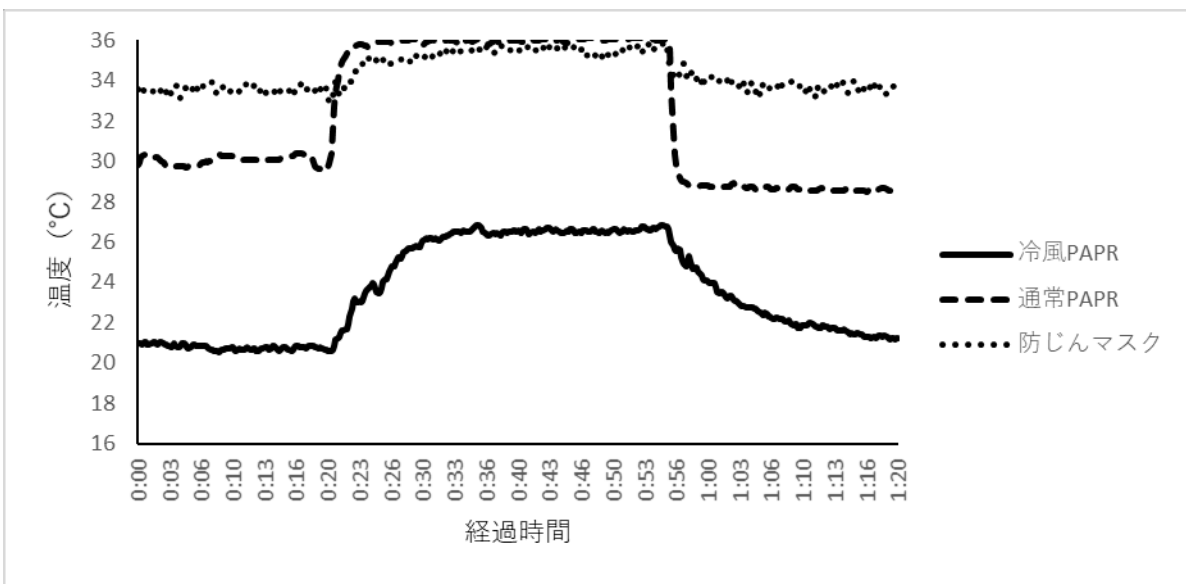


図 18-6 被験者 F のマスク内温度

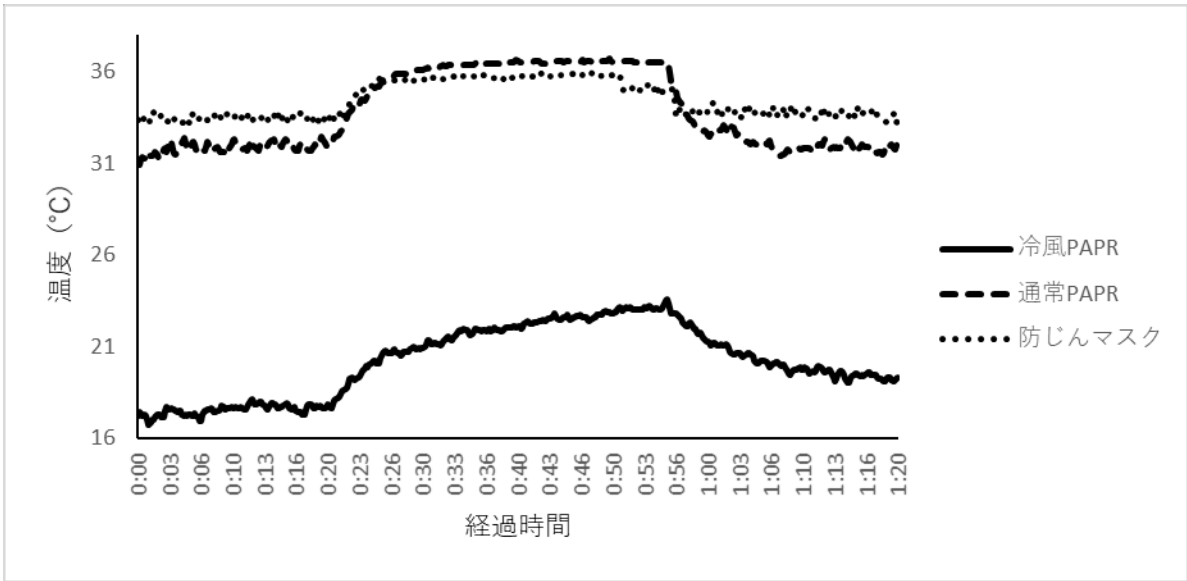


図 18-7 被験者 G のマスク内温度

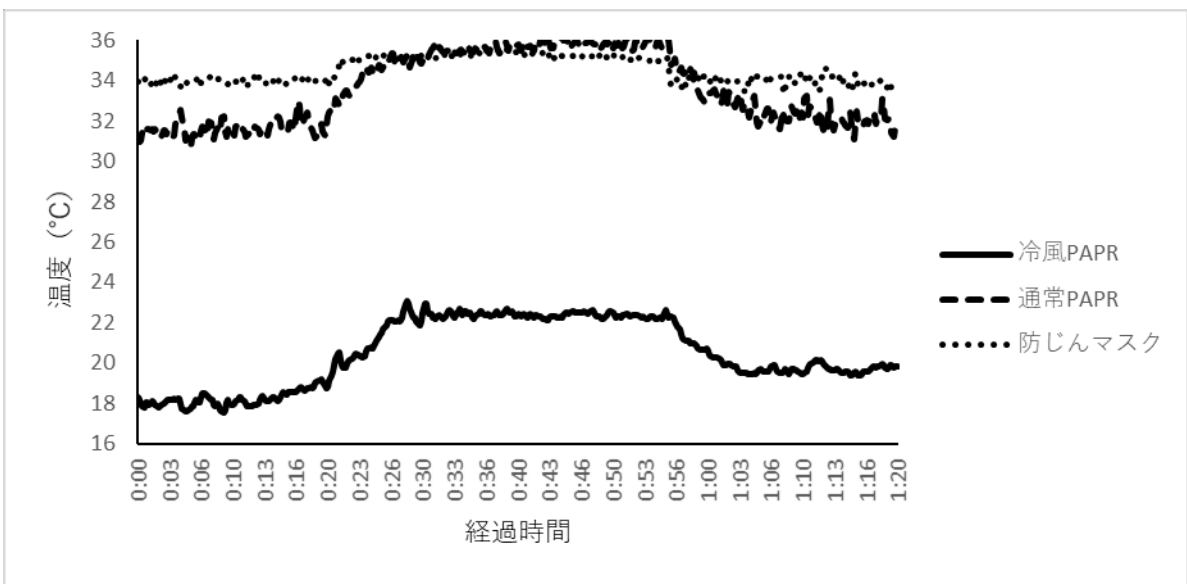


図 18-8 被験者 H のマスク内温度

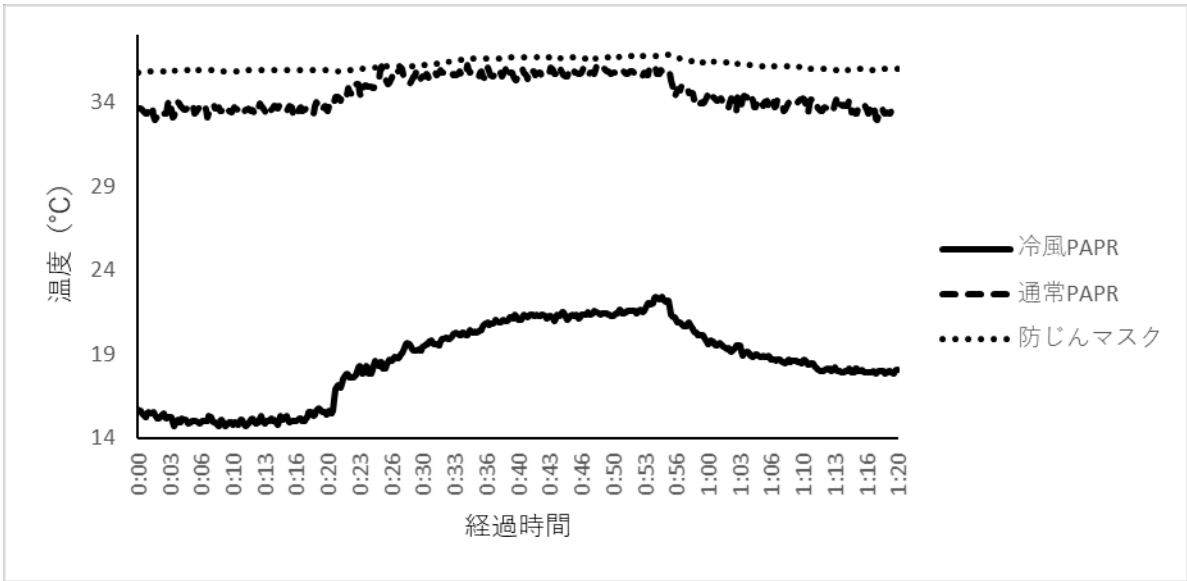


図 18-9 被験者 I のマスク内温度

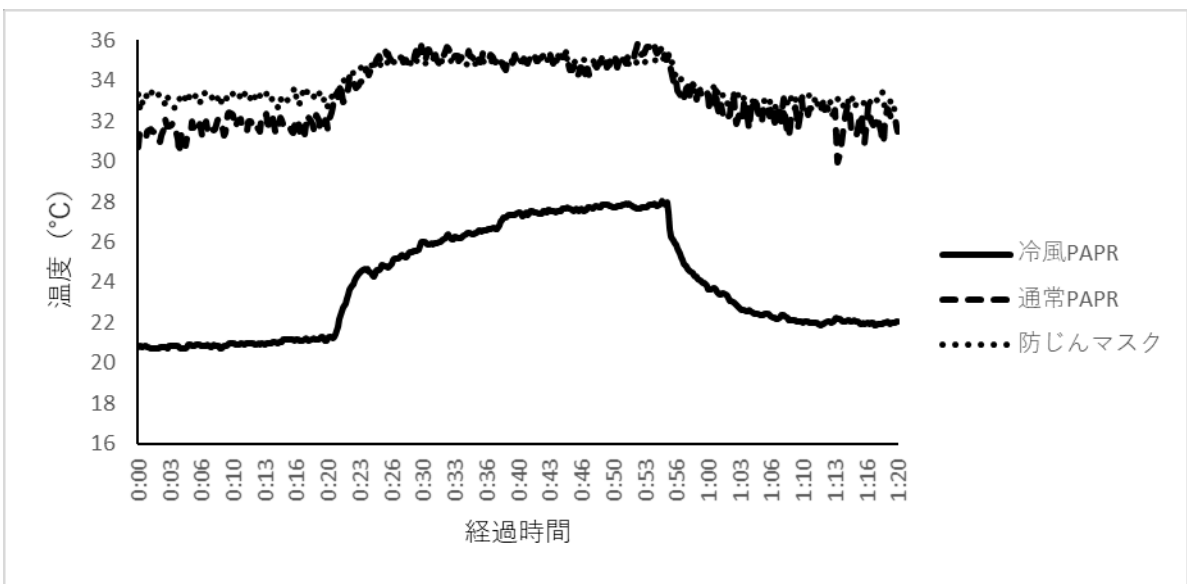


図 18-10 被験者 J のマスク内温度

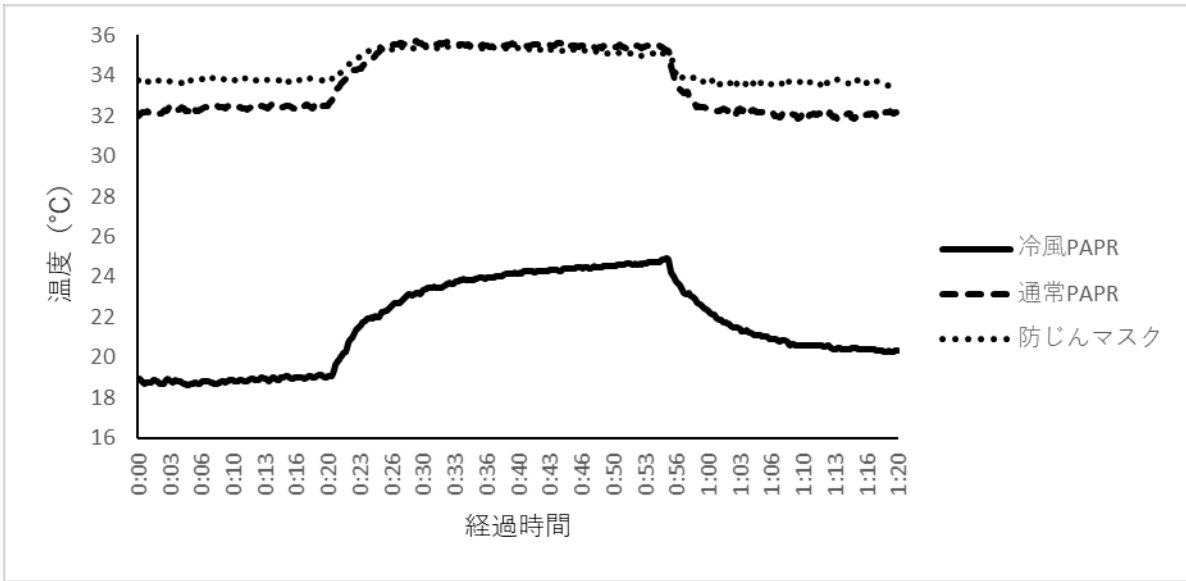


図 19 全被験者のマスク内温度

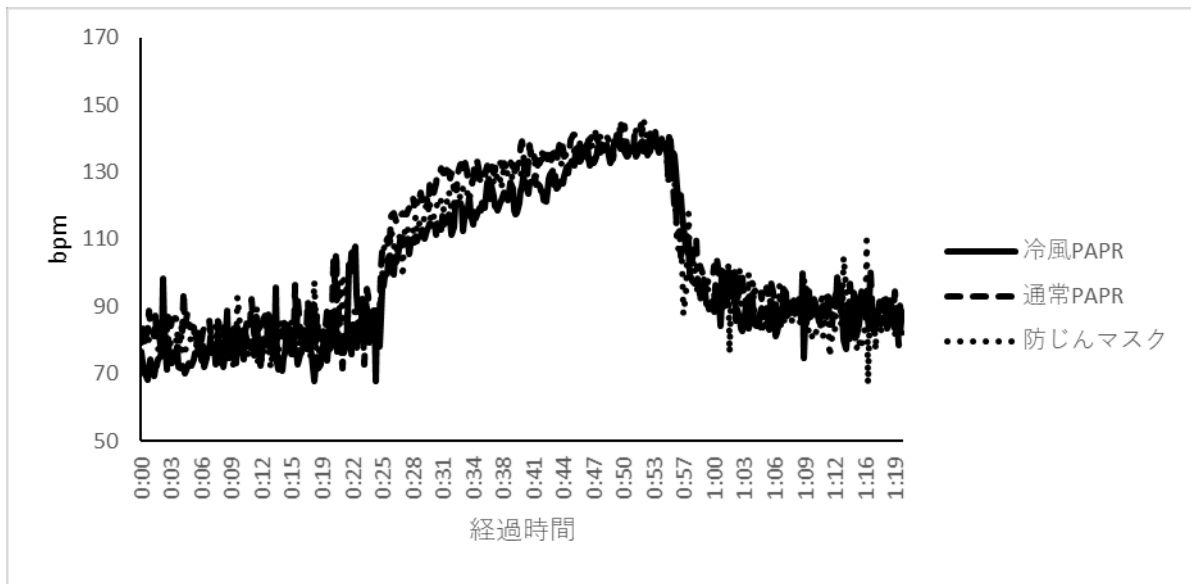


図 20-1 被験者 A の心拍数

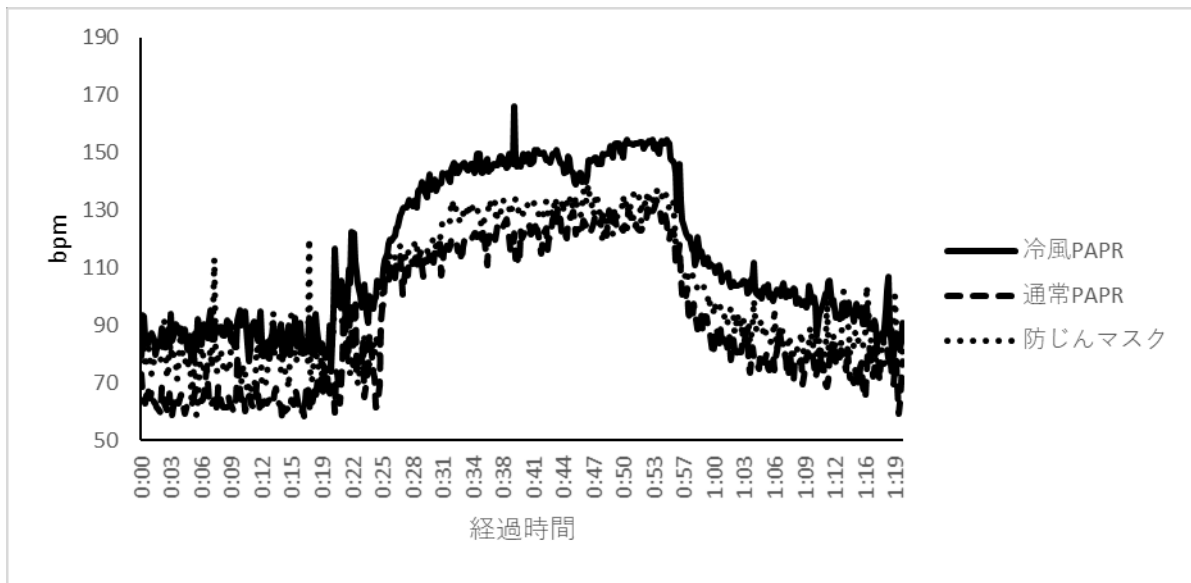


図 20-2 被験者 B の心拍数

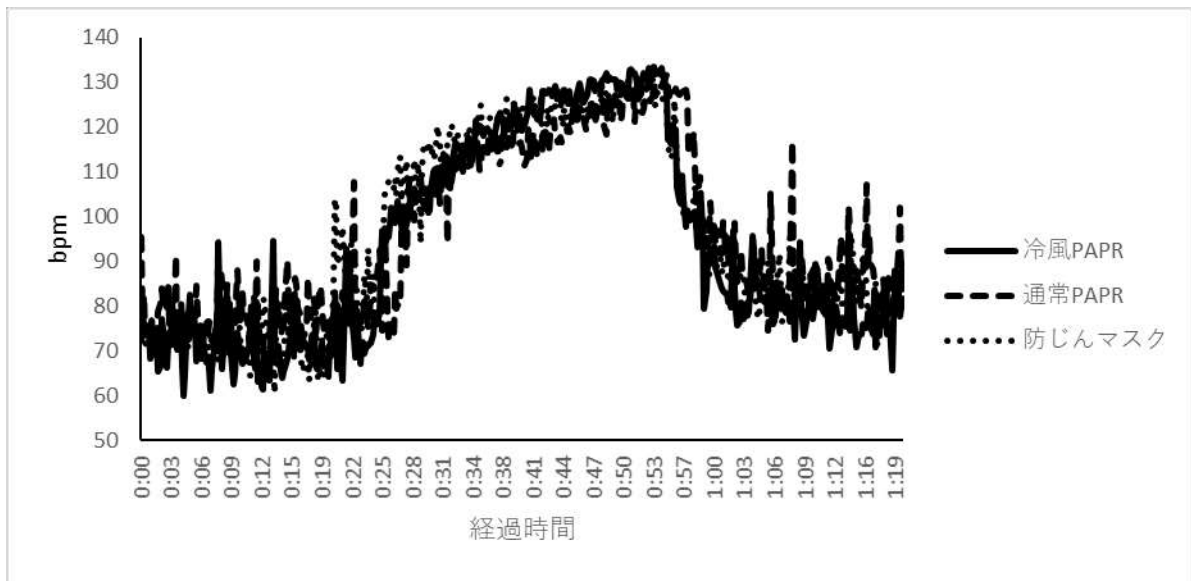


図 20-3 被験者 C の心拍数

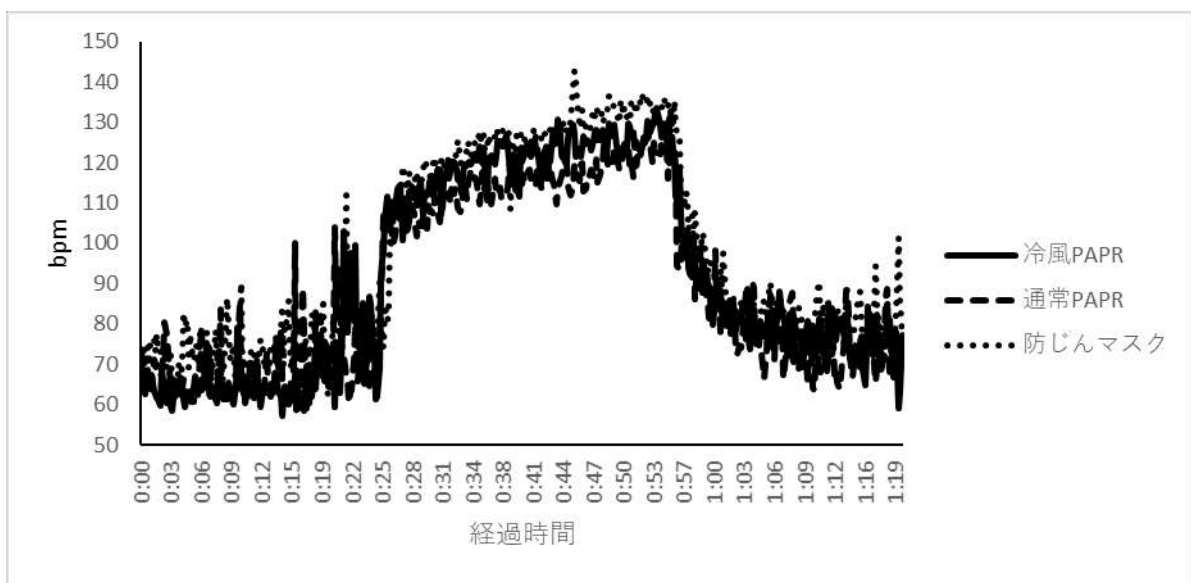


図 20-4 被験者 D の心拍数

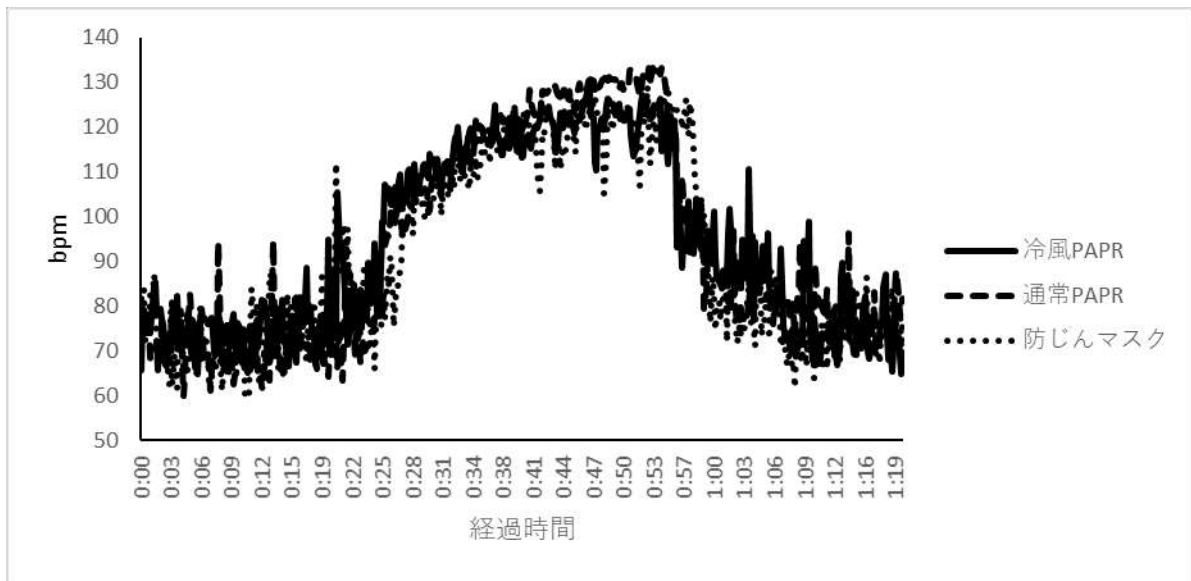


図 20-5 被験者 E の心拍数

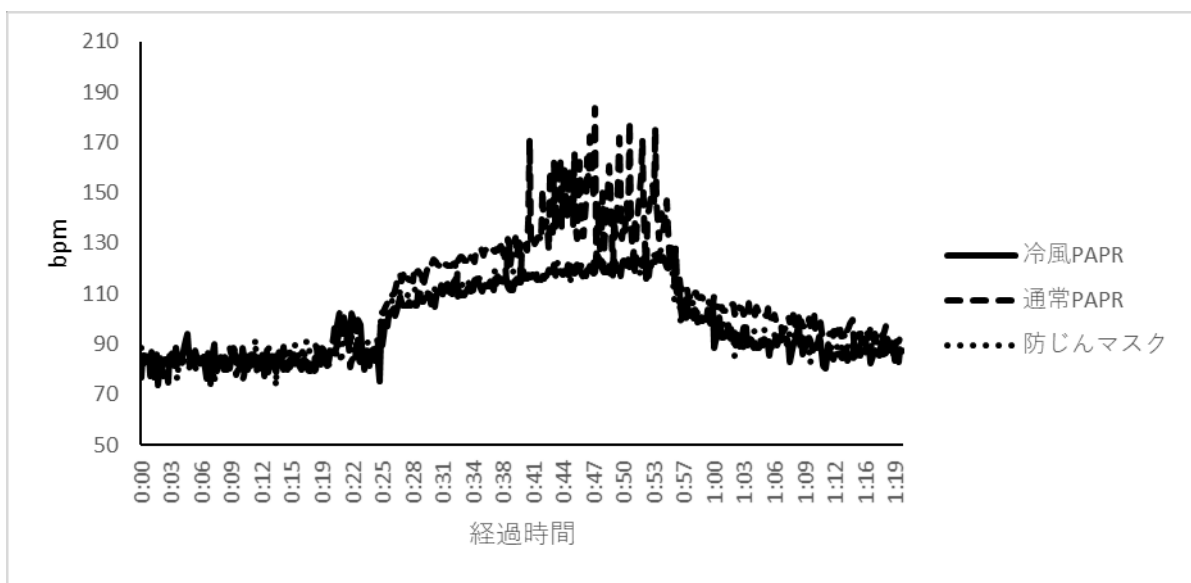


図 20-6 被験者 F の心拍数

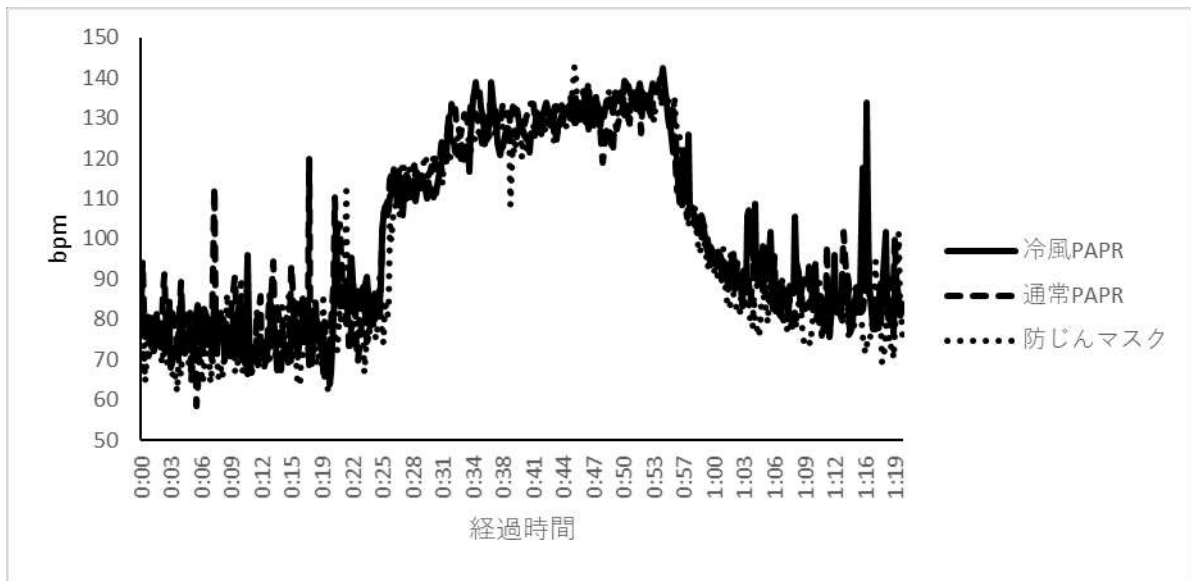


図 20-7 被験者 G の心拍数

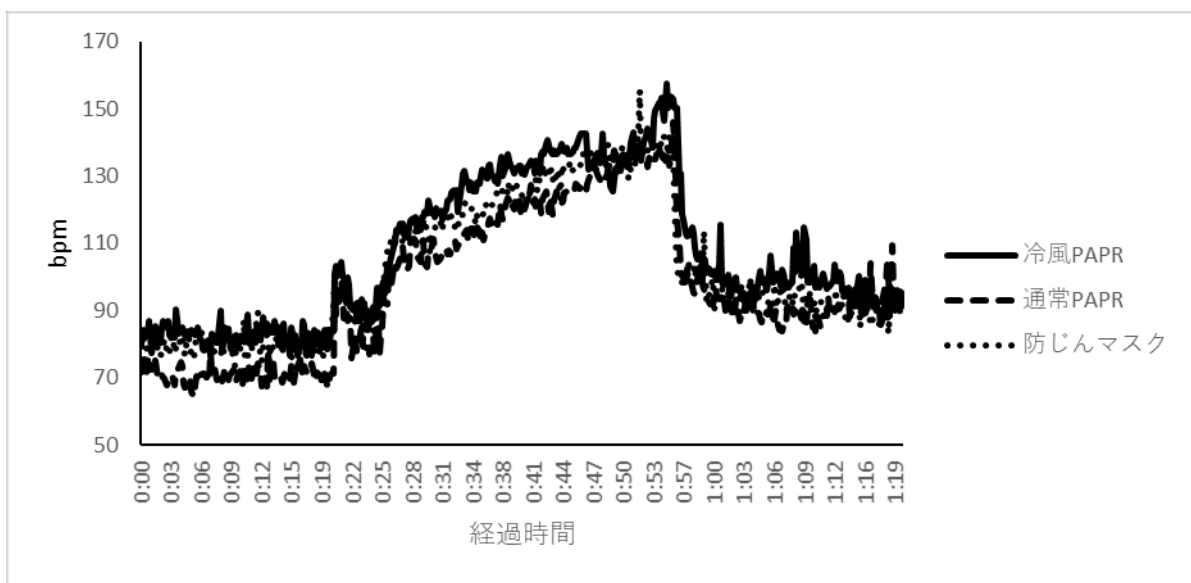


図 20-8 被験者 H の心拍数

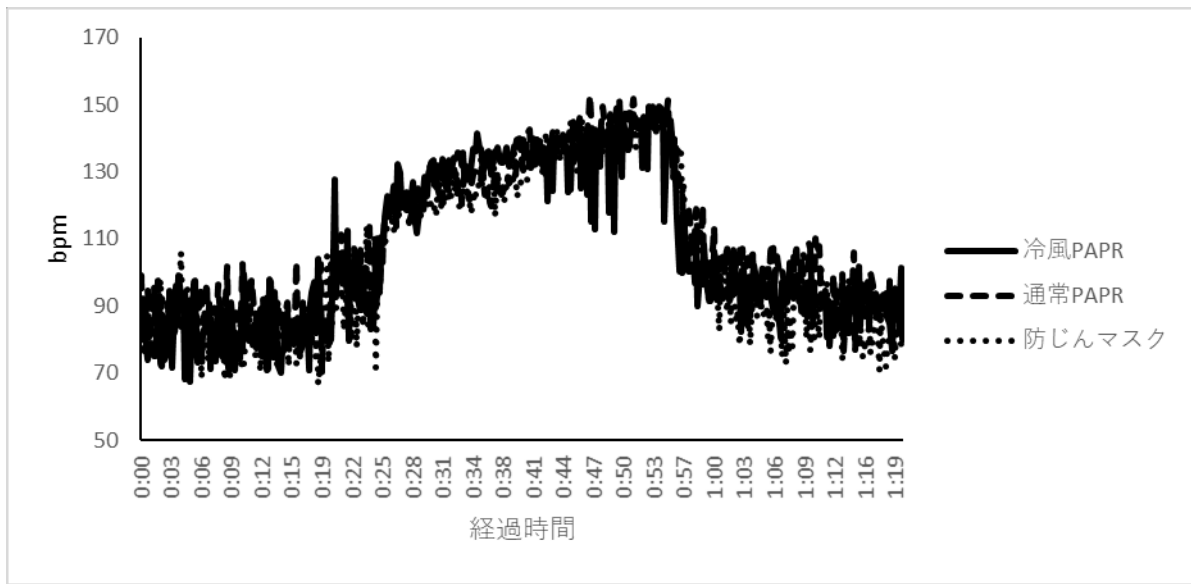


図 20-9 被験者 I の心拍数

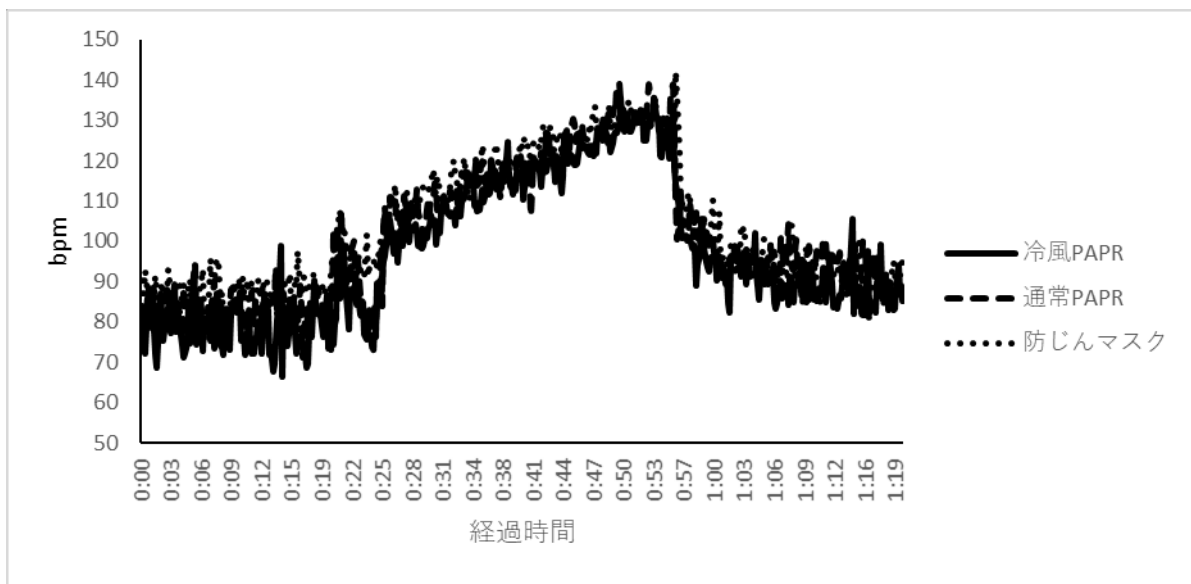


図 20-10 被験者 J の心拍数

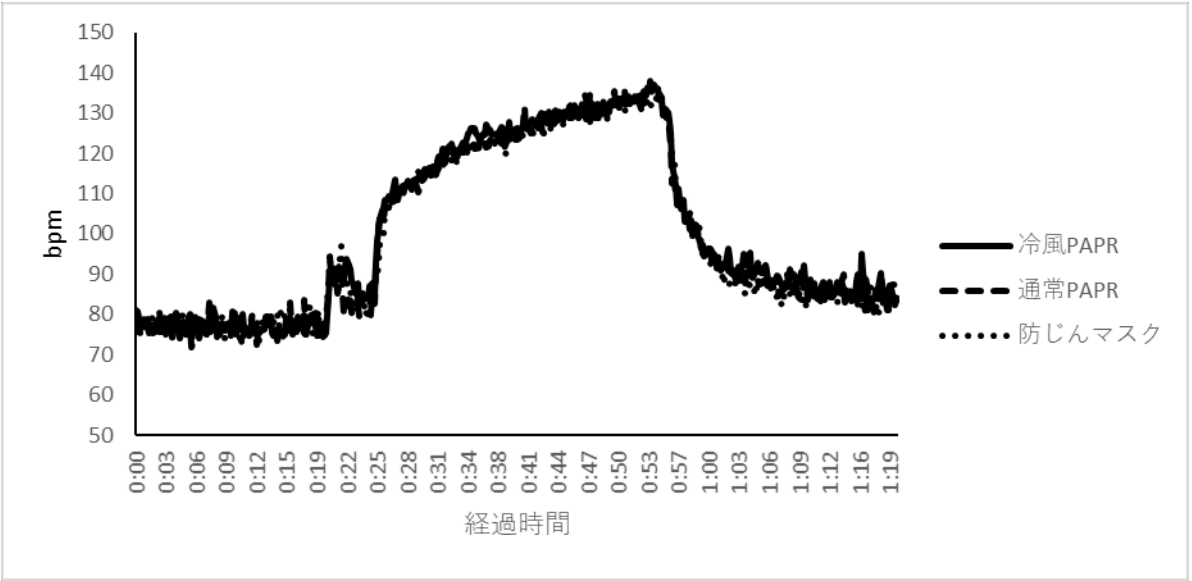


図 21 全被験者の心拍数

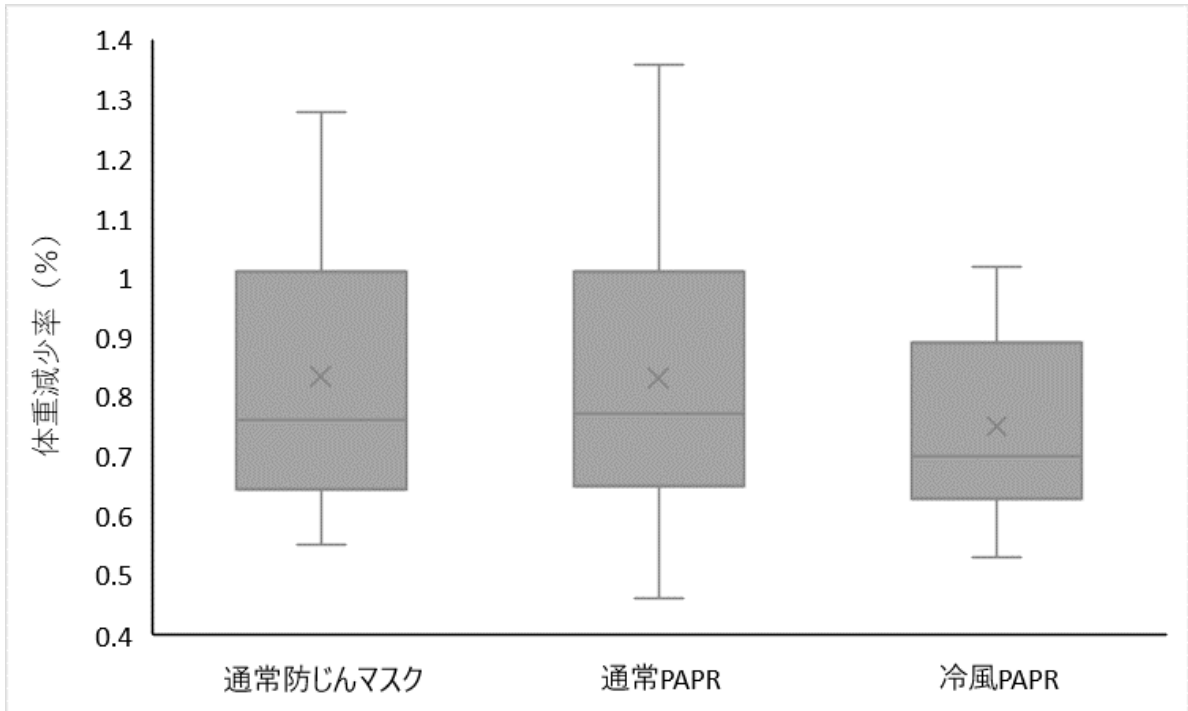


図 22 各測定条件における体重減少率

D. 考察

全被験者のマスク内温度の平均は、冷風 PAPR を使用した条件では、通常 PAPR あるいは防じんマスクを使用した条件と比較して、 10°C ほど低く保たれた。冷風 PAPR を使用した条件では、通常 PAPR あるいは防じんマスクを使用した条件と比較して、被験者は 10°C ほど低い空気を吸入していたと考えられる。

全被験者の直腸温差分の平均は、冷風 PAPR を使用した条件では、通常 PAPR あるいは防じんマスクを使用した条件と比較して、運動開始以降は低く保たれた。冷風 PAPR による冷気吸入が直腸温上昇を抑制したと考えられる。

全被験者の食道温差分の平均と心拍数の平均は、冷風 PAPR を使用した条件と通常

PAPR あるいは防じんマスクを使用した条件とで、明らかな差はないように見受けられた。本実験における測定条件の違いは、食道温上昇や心拍数上昇に明らかな影響を与えなかったと考えられる。

各測定条件における体重減少率は、冷風 PAPR を使用した条件では、通常 PAPR あるいは防じんマスクを使用した条件と比較して、低かった。本実験では測定中の飲水や排尿を行っていないので、体重減少量は発汗量を反映していると考えられる。そのため、冷風 PAPR による冷気吸入が発汗を抑制したと考えられる。

今回の結果より、冷風装置付き PAPR は通常の PAPR や通常の防じんマスクと比較し、暑熱環境下における身体負荷を軽減させる可能性が示唆された。