

## 半屋外・非空調空間を想定したパーソナル空調ベンチの開発

建築・都市環境工学研究室 保科 遥希  
指導教員 佐藤 理人

パーソナル空調 対流式 半屋外空間  
温熱環境 皮膚温度 熱中症予防

### 1. 研究背景と目的

近年、日本では地球規模での温暖化や都市化の進行により、夏季の平均気温が年々上昇している。過去5年間の全国データからも、熱中症リスクを評価する指標として使用されている湿球黒球温度(WBGT)の上昇が報告されており、スポーツ活動や建設現場などでその重要性が一層高まっている。こうした環境変化に伴い、熱中症による救急搬送者数は増加傾向にあり、令和6年度には過去最多を記録した。特に子ども(小中高生)のリスクが高く、熱中症疑いで救急搬送された子どもの約8割がスポーツ活動中に発症し、そのうち約7割が屋外で発生している。屋外での活動やスポーツにおける休憩場所としては、日陰や半屋外空間が利用されることが多いが、半屋外空間は直達日射を遮り自然な通風を得られる利点がある一方、アスファルトやコンクリートの輻射熱、人の集結による熱や空気の滞留などにより、屋内空間と比べると快適性に劣るという課題がある。

そこで本研究では、半屋外空間においても屋内に近い快適性を実現するため、人体近傍を効率的に冷却する「パーソナル空調」を取り入れたベンチを提案・開発した。そして試作した空調ベンチを用いて被験者実験を行い、暑熱条件下で使用した際の熱的快適性やベンチ周囲の温熱環境を評価するとともに、使用空調機のエネルギー性能を明らかにすることを目的とする。

### 2. パーソナル空調ベンチの概要

半屋外空間における人体冷却方式には、空調機や扇風機による対流方式、ドライミストを用いた蒸発冷却方式、天井などの表面を冷却する放射方式などが一般的に用いられている。本研究では、装置構成が簡易で低コストであり、かつ即効性に優れる対流方式に着目し、空調ベンチを試作した。本ベンチは半屋外および非空調空間での使用を想定し、劣悪な熱環境下においても効率的に冷却するため、人体近傍を集中的に冷却するパーソナル空調方式を採用している。なお、本研究では一般的なベンチの後方に設置する空調装置部を主な開発対象とした。

ベンチ後方に設置する空調装置外観及び分岐流路を図1に示す。空調機からチャンバー部までの流路は、各分岐とも圧力損失が等しくなるようダクト設計(アルミ管、

φ100mm)を行い、全ての吹出口から均等な風量が得られる構成とした。各吹出口からの合計流量は168.6m<sup>3</sup>/hである。吹出口高さ(中央部)は、ベンチの座面高さ及び成人男性の平均座高を考慮して、1100mmとし、血管や神経が集中し体温調節に大きな影響を及ぼす頸部に直接送風されるよう設計した。また空調機にはハイブリット式ダクトレススポットエアクーラーを使用した。本装置はヒートポンプ式の空調機であり、冷却過程で生じる排熱を水の気化冷却によって処理する構成とすることで、外部への排熱を抑制し、局所的な冷却を実現する。これにより、ベンチ周囲に高温空気が滞留しにくい環境を実現している。空調機の仕様を表1に示す。また吹出口には図2に示す手動開閉が可能なものを使用し、開口率が約24.6%で、ダイヤル操作により通風量を任意に調整可能である。またベンチの着座位置に依らず頸部付近に集中的に送風可能な開口幅及び高さを考慮して選定した。

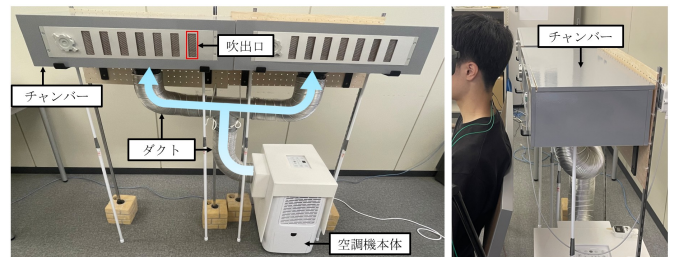


図1 空調装置外観及び分岐流路

表1 空調機の仕様

本体サイズ	W375×D280×H505mm	使用モード	冷風・送風
定格冷房消費電力	350W	風量	約168.6m <sup>3</sup> /h
定格冷房能力	600W	冷房吹出温度	18~30℃

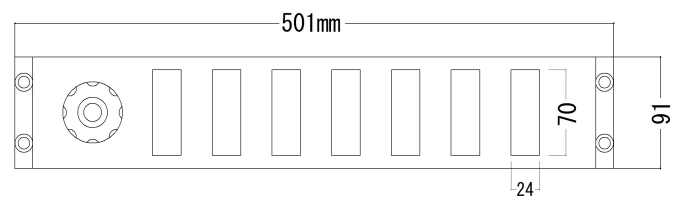


図2 ダイヤル調整式吹出口外形図

### 3. 実測概要

#### 3.1 実測対象室の概要

実測は高知工科大学内に設置した実験室にて実施した。本研究では半屋外空間での使用を主に想定しているが、本実測においては基礎的な性能を把握するため、外部風や放射等の非定常な環境要因に伴う変動影響を排除するため、密閉空間にて行った。対象室は22.4m<sup>2</sup>で北面に出入口を有し、南面には1.56m<sup>2</sup>の開口部があるが、内ブラインドによる日射遮蔽を行っている。また室中央天面には4方向天井埋込型室内空調機1台が設置されている。

本測定では、盛夏及び猛暑日を想定した使用条件を評価するため、室温は30~32°C,35~36°Cの2条件とした。また相対湿度は、成り行きとしたが、30~32°C測定時は約60~65%,35~36°C測定時は約50~55%となった。

また空調機運転条件としては、空調機（冷風モード）、空調機（送風モード）及び扇風機の3条件を設定した。

#### 3.2 温熱物理量測定概要

対象室の平面図を図3に、断面図を図4に示す。空調ベンチは室中央に配置し、空調機本体の給気口及び排気口、ならびに空調装置の吹出口において空気温度及び相対湿度を測定した。さらに、ベンチ北側には室内の空気温度、相対湿度、グローブ温度及び風速を測定する機材を高さ0.6mに配置した。これらの測定は全て10秒間隔とした。

#### 3.3 温熱生理量測定概要

温熱生理量測定<sup>注1)</sup>は、被験者頸部に低放射率熱流センサ及び標準熱流センサを縦列に貼付し、頸部皮膚温度及び熱流量を測定した。皮膚温度はセンサを医療用両面テープで貼付し10秒間隔で記録した。また頸部付近の体表面温度は放射カメラにより5分間隔で撮影した。

被験者は待機室<sup>注2)</sup>で30分安静状態の後、対象室入室後5分間椅座静位状態の後、15分間空調機を稼働させた状態での測定を行った。なお、空調ベンチ周囲の温熱環境測定のうち、被験者実験については安全面を考慮し、室内温度30~32°Cの条件のみで実施した。

#### 3.4 温熱心理量測定概要

試作した空調ベンチを高知工科大学のオープンキャンパス（2025年8月2日~8月3日）にて展示し、来場者に実際に使用してもらったうえでアンケート調査を実施し、空調ベンチ使用時の温熱心理量を把握した。アンケート項目は、「性別」「年齢」「発汗状況」「気流感（強さ・温度）」「快適感」「温冷感」「自由記入」とし、計130名の来場者からの回答を得た。

#### 3.5 空調機の省エネ性能評価

盛夏及び猛暑日を想定した条件下における空調ベンチ使用時の省エネ性能を評価するため、実測対象室の室内温度を30~32°C及び35~36°Cに設定し、空調ベンチに使用した空調機の消費電力量、COP及び気化冷却に使用する水量を15分間測定した。

表2 実測概要

実測	ベンチ周囲の温熱環境	被験者実験 (20代男女4人)	空調機の省エネ性能
期間	① 2025/08/29 ② 2025/09/18	2025/08/26 ~2025/08/29	① 2025/08/29 ② 2025/09/18
対象地	高知工科大学内に設置した実験室		
設定空気温度	① 30~32°C ② 35~36°C	30~32°C	① 30~32°C ② 35~36°C
主な測定内容	各測定点の温湿度	熱流量 皮膚温度 表面温度	瞬時電力 水使用量
吹出条件	空調機（冷風） 空調機（送風）	空調機（冷風） 空調機（送風） 扇風機	空調機（冷風） 空調機（送風）

表3 測定項目および測定機材

測定項目	測定機材
空気温度	温湿度計,RTR-503B,T&D
相対湿度	(温度:サーミスタ,湿度:高分子式)
グローブ温度	T熱電対 0.2mm Φ150mm
風速	熱線式風速計 DT-8880(エムケサイエンティフィック)
熱流量	低放射率熱流センサ T-内臓 M*AI(TOYOTA) (放射率ε=0.08)
皮膚温度	標準熱流センサ T-標準 M(TOYOTA) (放射率ε=0.86)
体表面温度	赤外線放射カメラ GTC 400 C (Bosch)
電力計	エコキーパー EC-03N

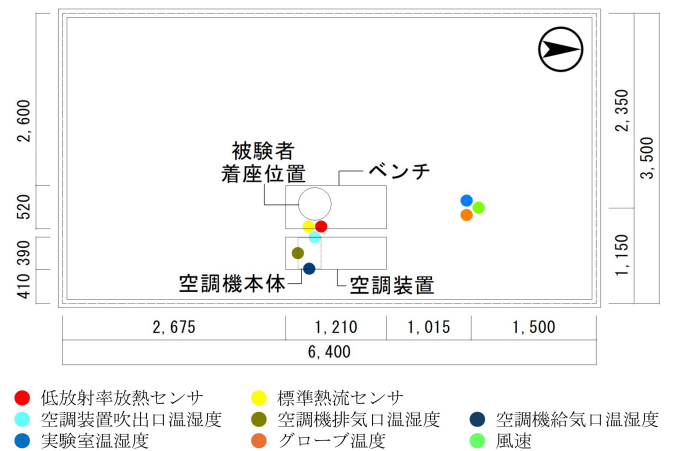


図3 実測対象室平面図

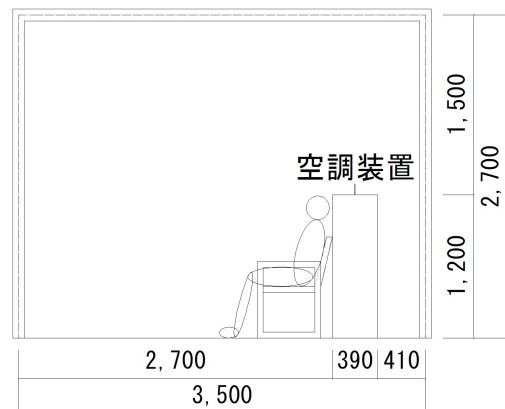


図4 実測対象室断面図

## 4. 実験結果

### 4.1 空調ベンチ使用時の周囲温熱環境

空気温度 30~32°C条件下における空調ベンチ使用時（冷風モード）の各測定点における温熱環境の変化を図5に、35~36°C条件下での結果を図6に示す。

まず、空気温度 30~32°C条件下では、冷風モード運転開始直後に吹出口温度が急激に低下し、約 26°Cとなり、室温との差は約 6°Cとなった。相対湿度に着目すると、冷風モードでは吹出口付近で約 15%の上昇が確認された。また、絶対湿度は吹出口において約 0.002~0.004kg/kg'の低下がみられた一方、排気口では運転開始15分後に約 0.005 kg/kg'の増加となった。比エンタルピーについても同様の傾向がみられ、吹出口では約 10~15kJ/kgの低下、排気口では約 15kJ/kgの増加となった。

次に、空気温度 35~36°C条件下では、冷風モード時に吹出口温度が室温より約 9°C低い値を示し、高温環境下においても約 27°Cの低温風が得られることが確認された。一方、相対湿度は運転開始前の約 50%から最大 77%まで上昇し、25%程度の増加となったが結露の発生はなかった。また排気口相対湿度は概ね 70%程度で推移した。絶対湿度及び比エンタルピーについては、空気温度 30~32°C条件下と同様の傾向を示し、吹出口では高温環境下においてもほぼ同程度の値となり 0.016kg/kg'前後を推移した。一方、排気口では 35~36°C条件下の方が、加湿冷却の促進により約 0.001kg/kg'高い約 0.024kg/kg'となった。

なお、いずれの条件下においても、実験室代表点と空調機本体の給気口における温度及び相対湿度はほぼ同程度の値を示しており、空調機からの排熱による影響はほとんどみられなかったことを確認している。

### 4.2 頸部皮膚温度の比較

被験者実験により測定した各吹出条件における頸部皮膚温度を図7に示す。空調機冷風モードでは、運転開始直後に皮膚温度が急激に低下し、最終的に 4°C以上の低下が確認された。一方、送風モード及び扇風機では、運転開始前と比較して低下がみられたものの、両者は同程度の値を示し、低下量は約 1°Cにとどまった。これらから、冷風が頸部に直接作用することで、局所的ではあるが皮膚温度冷却効果が高いことが示された。図8に冷風モード時（測定開始 20 分後）の頸部付近の放射温度分布を示す。後頭部付近が 30°C以上であったのに対し、頸部では約 27°Cまで低下していることが確認された。

### 4.3 人体熱流量測定結果

空調機使用時における人体熱流量（15 分間平均値）を図9に示す。対流成分に着目すると、いずれの条件下においても運転開始後に放射量の大幅な増加が確認された。冷風モードでは約 150W/m<sup>2</sup>を示したのに対し、送風モード及び扇風機では約 50~100 W/m<sup>2</sup>にとどまり、吹出条件の違いによる明確な差が確認された。一方、放射成分については、いずれの条件下においても低い値を示した。

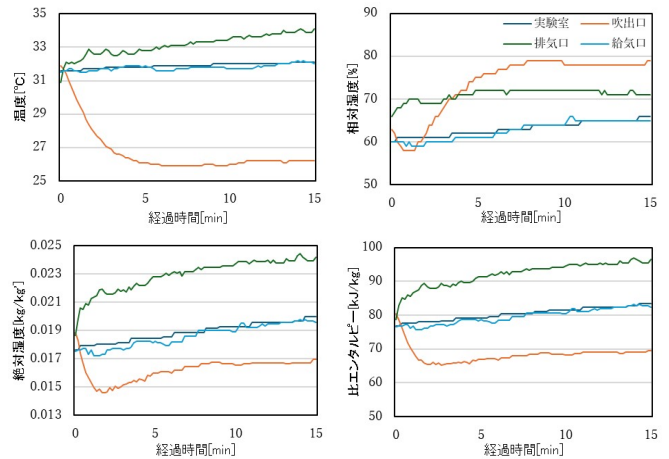


図5 空気温度 30~32°C時の温熱環境（冷風モード）

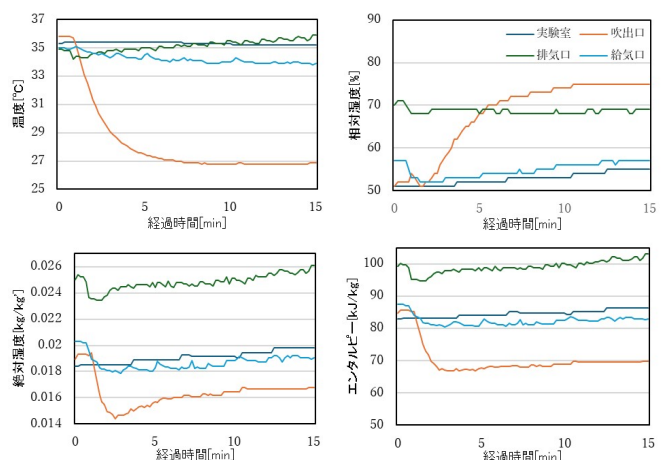


図6 空気温度 35~36°C時の温熱環境（冷風モード）

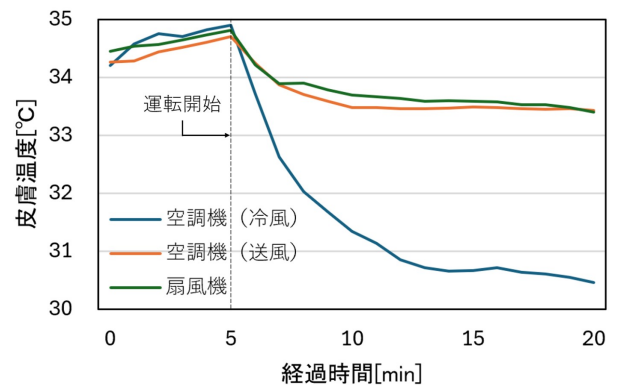


図7 吹出条件別の頸部皮膚温度の比較（空気温度 30~32°C時）

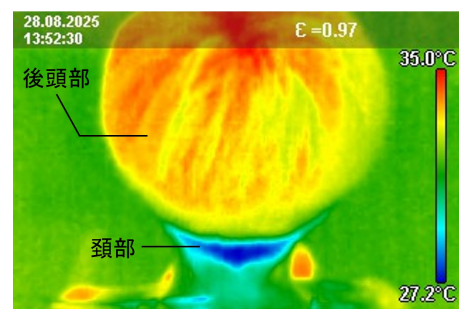


図8 頸部表面温度（実験室内温度:31.3°C）

#### 4.4 温熱心理量及び快適性評価結果

発汗状況別の気流感（強さ・温度）、快適感及び温冷感に関するアンケート結果を図10に示す。気流強さについては、いずれの発汗状況においても半数以上が「普通」と回答したが、発汗ありでは「やや弱い」、発汗なしでは「やや強い」と感じる回答が一部にみられた。気流温度については、全ての発汗状況において約80%が「普通」と回答し、その他には「やや寒い」と感じる回答が共通してみられた。快適感では、全体的に不快よりも快適と評価する回答が多く、発汗ありでは「快適」、発汗なしでは「やや快適」と回答する傾向がみられ、発汗の有無による違いが確認された。温冷感については、いずれの発汗状況においても60%以上が「普通」と回答したが、発汗ありでは「やや暑い」「暑い」、発汗なしでは「やや寒い」と回答する割合が多く、対照的な傾向を示した。

#### 4.5 外気温別の空調機性能

実験室において設定空気温度別にエネルギー性能を評価した結果を表5に示す。冷風モードにおける瞬時電力は約300Wであり、送風モードの約4倍、扇風機の約12倍であった。設定空気温度が30~32°Cから35~36°Cへ上昇した場合においても、瞬時電力の増加はわずかであり、高温環境下においても消費電力が大きく増加しないことが確認された。一方、冷風モードにおける水使用量は、高温条件下では約1.5倍に増加しており、外気温の上昇に伴い、排熱冷却のための水消費量が増加する傾向が示された。また、COPはいずれの条件下においても2.1程度であった。一般的な家庭用エアコンのCOPが5前後、気化冷却を採用しない局所空調が3前後であることと比較しても、エネルギー効率は低い。これは、排熱処理に水を用いた気化冷却方式を採用していることが影響していると考えられ、COP向上が本システムの課題の一つであるといえる。

#### 5. まとめ

試作したパーソナル空調ベンチは、高温環境下でも冷風によって頸部を効果的に冷却し、皮膚温度の低下と高い快適性を得られることを確認した。今後は、実環境下での快適性確認とともに、冷風温度の調節性向上、水使用量の削減、COP向上を図っていく。

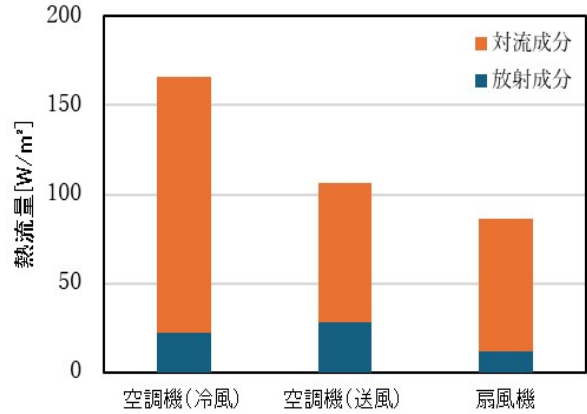


図9 吹出条件別の対流・放射成分別熱流量

表4 オープンキャンパス時の条件と来場者内訳

温度[°C]	26~27		相対湿度[%]		60~64	
	10代	20代	30代	40代	50代	60代
男性[人]	33	33	1	8	4	1
女性[人]	17	19	1	10	3	0

発汗あり	8	やや発汗あり	42
ほとんど発汗なし	53	発汗なし	27

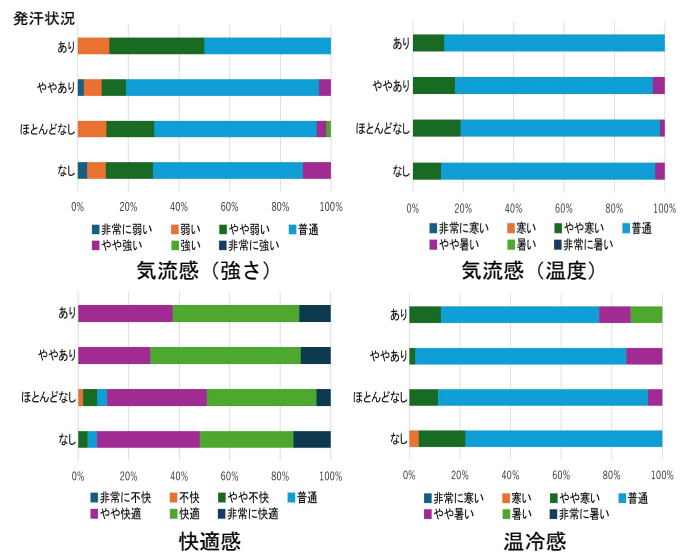


図10 発汗状況別の熱的快適性評価

表5 吸込空気温度別のエネルギー性能評価

設定空気温度	30~32°C			35~36°C		
吹出条件	冷風	送風	扇風機	冷風	送風	扇風機
瞬時電力[W]	294	73	25	300	73	25
水使用量[kg/h]	1.88	0.60	—	2.64	0.89	—
COP	2.10	—	—	2.18	—	—
顕熱処理量[W]	281	—	—	327	—	—
潜熱処理量[W]	336	—	—	326	—	—

謝辞) 本研究を実施するにあたり、多くの被験者の方々にご協力を頂きました。ここに記し、謝意を表します。  
 注1) 本研究は高知工科大学倫理審査委員会の承認(承認番号:302)を得て実施した。  
 注2) 待機室の温熱環境についてはPMV=0相当とした。  
 参考文献)  
 1) 令和6年4月24日~10月23日までの全国の暑さ指数(WBGT)の観測状況及び熱中症による救急搬送人員と暑さ指数(WBGT)の関係について(令和6年度最終報),環境省 [https://www.wbgt.env.go.jp/pdf/report/R06\\_heatillness\\_report\\_24.pdf?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.wbgt.env.go.jp/pdf/report/R06_heatillness_report_24.pdf?utm_source=chatgpt.com), (参照日 2025/5/6)  
 2) スポーツ栄養 Web【小中高生の熱中症救急搬送の8割がスポーツ活動中に発生】 <https://sndj-web.jp/news/003388.php>, (参照日 2025/5/9)  
 3) 久保田,小山,花園,野部:小規模実用『ZEB』の計画及び運用状況に関する調査研究(その3) D型空調椅子の運用時評価,空気調和衛生工学会大会学術講演論文集,pp.45-48, 2020.9  
 4) 須藤,村上,加藤,宋,近本:人間の熱的適応性を考慮したパーソナル空調システムに関する研究第1報—従来型パーソナル空調システムの被験者実験による評価,空気調和衛生工学会論文集 No. 95, pp.53-61, 2004.10