

放射空調オフィスにおけるドライミスト利用クールスポットの設置効果に関する研究

ドライミスト及び気流の同時付与と体表面冷却ツールによる初期温冷感復帰時間の短縮効果

Study on the Effect of Setting up a Cool Spot Using Fine Mist Spraying in the Radiation Cooling/Heating System Office

Shortening effect of restoration time by simultaneous exposure to fine mist and airflow, and by body surface cooling tool

垂水 弘夫*
Hiroo Tarumi

Keywords : Radiation Cooling/Heating, Cool Spot, Simultaneous Exposure to Fine Mist and Airflow
放射空調、クールスポット、ドライミスト及び気流への同時曝露

1. はじめに

ZEB化を目指す建築物が登場する中、その要素技術の1つに位置付けられる天井放射空調システムを採用するオフィスビルが増加している。しかし、その均一的マイルドさが特徴とも云える温熱環境では、外出などにより代謝量が上昇したオフィスワーカーにとって、温熱快適性が確保できない事態も指摘されている。そこでオフィスによってはクールスポットを設定し、短時間でクールダウンを行う試みが行われ、これまでに複数の研究者らによる研究報告がなされている。ただ、報告数が限られる中で、1.0cloの状態ではクールスポットの適正滞在時間を求めるなど、やや想定しにくい状況の報告も含まれている。

本研究では、クールビズ空調(0.5clo)を前提に、男女複数名から成る被験者試験を通じ、放射空調空間で執務するオフィスワーカーが、外出後にクールスポットを利用する際の代謝量に応じた適切な温熱環境レベルと滞在時間について、温熱快適性・作業効率が元に復するまでの分数を指標に評価し、新たなクールスポット環境条件の提案を行うことを目的としている。

これまで屋内設置のクールスポットにおけるクールダウン方法として、ドライミストの適用を考案した研究例はみられない。そこで本研究では、温湿度・気流条件の設定だけでなく、30秒間程度のドライミスト噴霧を加えた場合の時間短縮効果についても明確にする。2022年までの垂水研究室で実施した先行研究^{1)~5)}では、クールスポット内の気流付与エリアにおける気流速度の増加と、放射空調室入室後のUSBファン使用の実験を行い、初期温冷感復帰時間は3分42秒までに縮まっていた。2023年夏に実施した本研究では、ドライミスト噴霧と気流の同時付与を行うクールスポットを新たに提案し、初期温冷感復帰時間に短縮効果が認められるかを明確にする。加えて、体表面冷却ツールの装着による時間短縮についても検証する。

2. 試験概要

2.1 実験室とクールスポットの詳細

図1に研究概念図、図2に金沢工業大学・地域防災環境科学研究所5階に設置された地下水利用・放射空調実験室の平面図兼機材配置図を示す。実験室内のPMV制御値は+0.5とする。廊下に同時付与エリアと気流付与エリアのクールスポットを設置し、設定空気温度は28℃である。表1に試験で使用する機器とその条件をまとめたものを示す。同時付与エリアではドライミストと扇風機を設置し、気流付与エリアでは扇風機を設置する。扇風機の気流速度は1.5m/s、2.0m/sの2ケース、ドライ

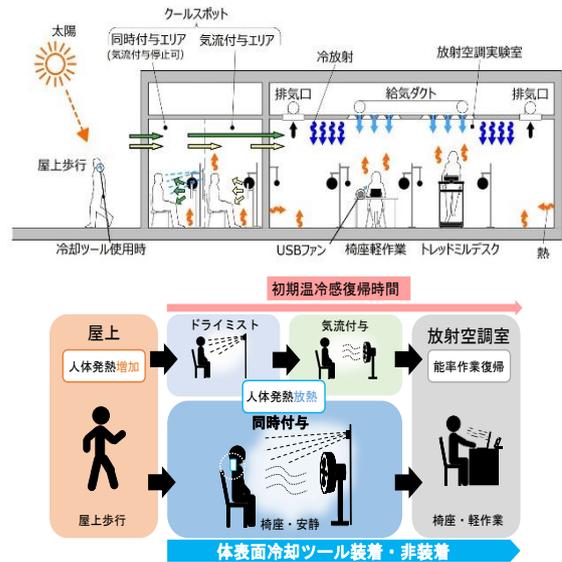


図1 研究概念図

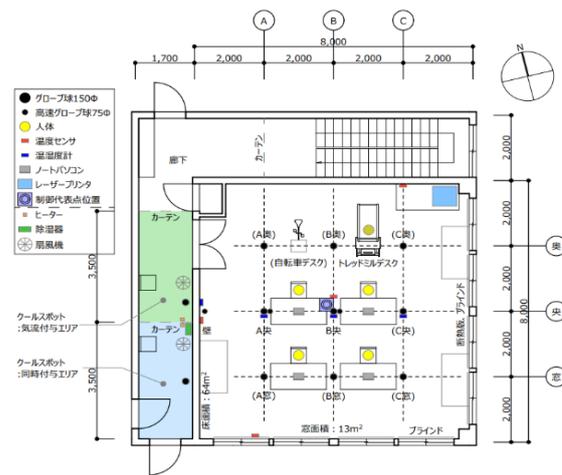


図2 実験室平面図兼機材配置図

ミストの噴霧量は0.04L/min(1口吹出)、0.09L/min(2口吹出)の2ケースを設定した。滞在時間は、同時付与では60秒、別々付与ではドライミスト曝露30秒、気流付与60秒である。実験室で使用されるUSBファンの気流速度は顔近傍で1.5m/sである。図3に人体に対するドライミストと扇風機の距離を示す。

* 金沢工業大学名誉教授 工博 水素建築ラボ代表 Professor Emeritus at Kanazawa Institute of Technology, Dr. Eng. Laboratory Representative of Hydrogen Energy Source Architecture

2.2 被験者に関する試験内容

試験期間は2023年7月3日から8月30日までであった。被験者は女2名、男2名であり、9:00~16:30まで在室する。表2に試験概要を示す。各エリアでの環境条件、行動別代謝量、歩行・滞在時間やアンケートを行う時間をまとめたものである。図4に被験者の行動パターンを示す。屋上歩行は、運動強度を4.8km/hとし、10分間従事する。体表面冷却ツールを装着するケースでは、屋上歩行開始時から放射空調室に戻り、歩行前の温冷感に復するまでの間、体表面冷却ツールを首元に装着する。天候については、雨天を除き屋上歩行試験を実施した。

3. 被験者試験の結果

3.1 試験データの選定とPMV平均

図5に屋上歩行の試験実施回数を示す。延べ407人分のデータから、選定条件に基づき360人分の試験データを選定した。選定条件を以下に示す。

- 1) 放射空調実験室内PMV制御値：試験時平均 0.5 ± 0.25 以内
- 2) 外気温度：試験時平均 27°C 以上
- 3) 屋上WBGT：試験時平均 27°C 以上

選定したデータにおける放射空調実験室の試験時平均PMVと試験ケース別のクールスポット内平均乾球温度を図6に示す。

3.2 クールスポット経由前後による全身温冷感申告の変化

図7は体表面冷却ツール未装着時の8試験ケースについて、クールスポット経由前後の全身温冷感変化に関する6段階の各ポイント低下ランクが占める割合を示している。ドライミスト噴霧ノズルが2口で気流速度が 2.0m/s の試験ケースを取り上げ、2.0ポイント以上低下した割合を比較すると、別々付与では35%のところ、同時付与では90%にまで割合が増加している。ドライミスト及び気流の同時付与による人体冷却効果が高いことは明確であろう。

3.3 同時付与後の人体表面温度の比較

表3は体表面冷却ツール装着・未装着の別に、クールスポット経由前後の人体表面温度の例である。体表面冷却ツール未装着時（上段）において、胸部温度の低下が 4.1°C と他部位と比較して最も大きく、体表面冷却ツール装着時（下段）においても、胸部温度の低下が 6.8°C と最も大きくなっている。

体表面冷却ツール装着・未装着に依らず、クールスポット経由後に人体表面温度の低下が観測されるが、その低下幅は体表面冷却ツール装着時の方が大きくなる傾向にあることが理解された。

3.4 屋上歩行による初期温冷感復帰時間

図8に屋上歩行時のクールスポット条件別初期温冷感復帰時間（外出行動後に、放射空調の執務室に戻ってのち熱的快適感が快適側となるまでの時間。ドライミストエリアやクールスポットを経由する場合はその滞在時間を含む。）を示す。体表面冷却ツール未装着時の非経由における初期温冷感復帰時間が8分37秒であったのに対して、2口吹出・ 2.0m/s の別々付与では2分31秒の短縮時間で6分6秒の初期温冷感復帰時間となった。同条件での同時付与においては3分53秒の時間短縮で4分44秒の初期温冷感復帰時間となった。非経由及び別々付与と比較して、同時付与の人体冷却効果の高さが示された。

また、体表面冷却ツール装着時（右欄）においては、非経由、別々付与、同時付与の何れにおいても、初期温冷感復帰時間に短縮がみられた。2口吹出・ 2.0m/s の同時付与では、4分1秒の初期温冷感復帰時間となったものである。

表1 使用機器と条件

機器	条件		備考
扇風機	気流速度	1.5 m/s	
		2.0 m/s	
USBファン		1.5 m/s	被験者との距離：72cm
ドライミスト	噴霧量	0.04 L/min	1口吹出
		0.09 L/min	2口吹出

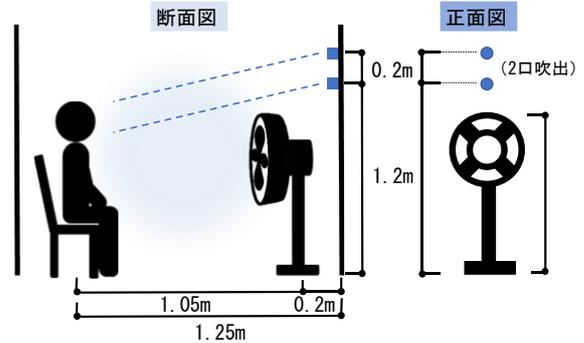


図3 人体に対するドライミストと扇風機の距離

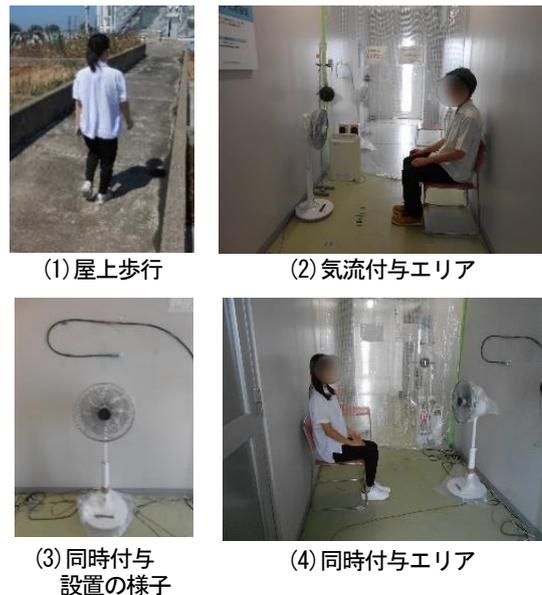


写真1 試験の様子

表2 試験概要

実施期間2023/7/3(月)~2023/8/30(水)				
	体表面冷却ツール装着の有・無			放射空調室 USBファン使用
	屋上歩行	気流付与エリア	同時付与エリア	
環境条件	試験時温度 27°C 以上 試験時WBGT 27°C 以上	目標温度 28°C 気流速度 1.5m/s 、 2.0m/s	目標温度 28°C 気流速度 1.5m/s 、 2.0m/s 噴霧量 1口吹出、2口吹出	PMV設定 $+0.5$ 気流速度 1.5m/s
行動別代謝量	屋上歩行 2.5Met	椅座 1.0Met	椅座軽作業 1.2Met	椅座軽作業 1.2Met
歩行・滞在時間	10分	60秒	60秒 (別々付与時：30秒)	快適判断時まで
アンケート調査	終了時	入退出時	入退出時	快適判断時

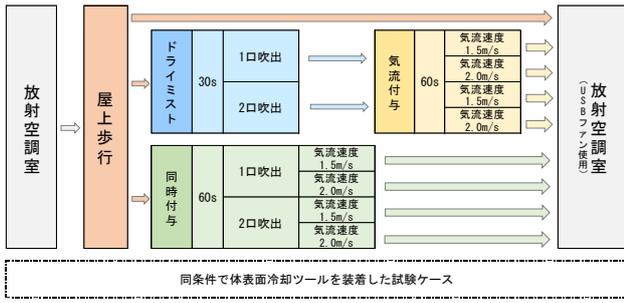


図4 被験者の行動パターン

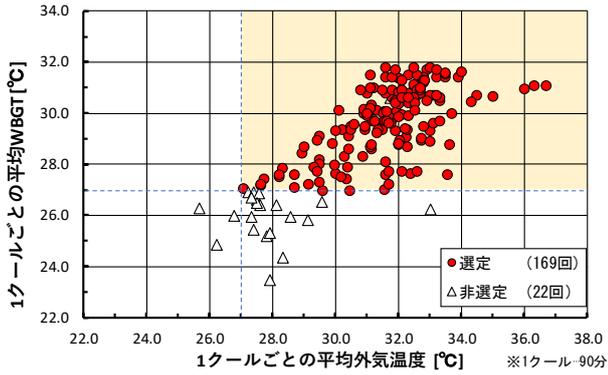
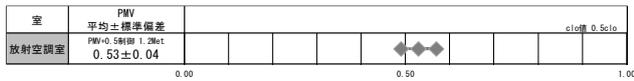


図5 屋上歩行の試験実施回数



(1) 放射空調実験室

室	試験ケース	乾球温度制御 平均乾球温度±標準偏差
気流付与エリア	気流1.5m/sドライミスト 別々付与	27.5 ± 0.90
	気流2.0m/sドライミスト 別々付与	27.5 ± 0.97
同時付与エリア	気流1.5m/sドライミスト 別々付与	28.0 ± 0.88
	気流2.0m/sドライミスト 別々付与	28.1 ± 0.99
	気流1.5m/sドライミスト 同時付与	27.9 ± 0.94
	気流2.0m/sドライミスト 同時付与	27.9 ± 0.78

(2) 試験ケース別クールスポット乾球温度

図6 各室の試験時平均PMVと乾球温度

全身温冷感	
+1.5	非常に暑い
+1.0	暑い
+0.5	やや暑い
0	中立
-0.5	やや寒い
-1.0	寒い
-1.5	非常に寒い

低下ランク	
3.0ポイント低下	
2.5ポイント低下	
2.0ポイント低下	
1.5ポイント低下	
1.0ポイント低下	
0.5ポイント低下	

条件	ノズル数	気流速度	ポイント低下ランクの割合(%)				屋上歩行後→クールスポット経由後			
別々付与	1口吹出	1.5m/s	16	16	47	21				
		2.0m/s	11	11	16	47	16			
	2口吹出	1.5m/s	5	25	20	25	25			
		2.0m/s		35		40	10	15		
同時付与	1口吹出	1.5m/s	5		47	26	16	5		
		2.0m/s		32	21	37	11			
	2口吹出	1.5m/s	11	32		42	16			
		2.0m/s	5		70		15	10		

図7 全身温冷感に関するポイント低下ランクが占める割合

表3 クールダウン前後の人体表面熱画像

ツール未装着	熱画像	歩行後		同時付与後			
		温度(°C)	頭部	顔面	温度(°C)	頭部	顔面
ツール未装着	熱画像	歩行後	35.0	35.2	同時付与後	33.1 [-1.9]	34.9 [-0.3]
		温度(°C)	35.5	35.4	32.4 [-3.1]	32.3 [-3.1]	
		腕部	35.4	32.3 [-3.1]			
		胸部	33.7	29.6 [-4.1]			
ツール装着	熱画像	歩行後	35.5	36.6	同時付与後	31.8 [-3.7]	34.3 [-2.3]
		温度(°C)	37.0	36.8	31.9 [-4.9]	31.9 [-4.9]	
		腕部	37.0	33.1 [-3.9]			
		胸部	36.2	29.4 [-6.8]			

※ []内: (同時付与後) - (歩行後)

	冷却ツール未装着		ケース	冷却ツール装着		冷却ツール未装着	冷却ツール装着	冷却ツールによる差
	8:37	非経路との復帰時間の差		6:19	8:37			
別々付与	1:18	5:49	1:00	30"	4:27	7:19	5:57	1:22
	1:52	5:15	1:00	30"	4:31	6:45	6:01	0:44
	2:17	4:50	1:00	30"	3:53	6:20	5:23	0:57
	2:31	4:36	1:00	30"	3:58	6:06	5:28	0:38
同時付与	3:17	4:20	1:00	1:00	3:53	5:20	4:53	0:27
	3:26	4:11	1:00	1:00	3:41	5:11	4:41	0:30
	3:52	3:45	1:00	1:00	3:32	4:45	4:32	0:13
	3:53	3:44	1:00	1:00	3:01	4:44	4:01	0:43

図8 試験ケース別初期温冷感復帰時間

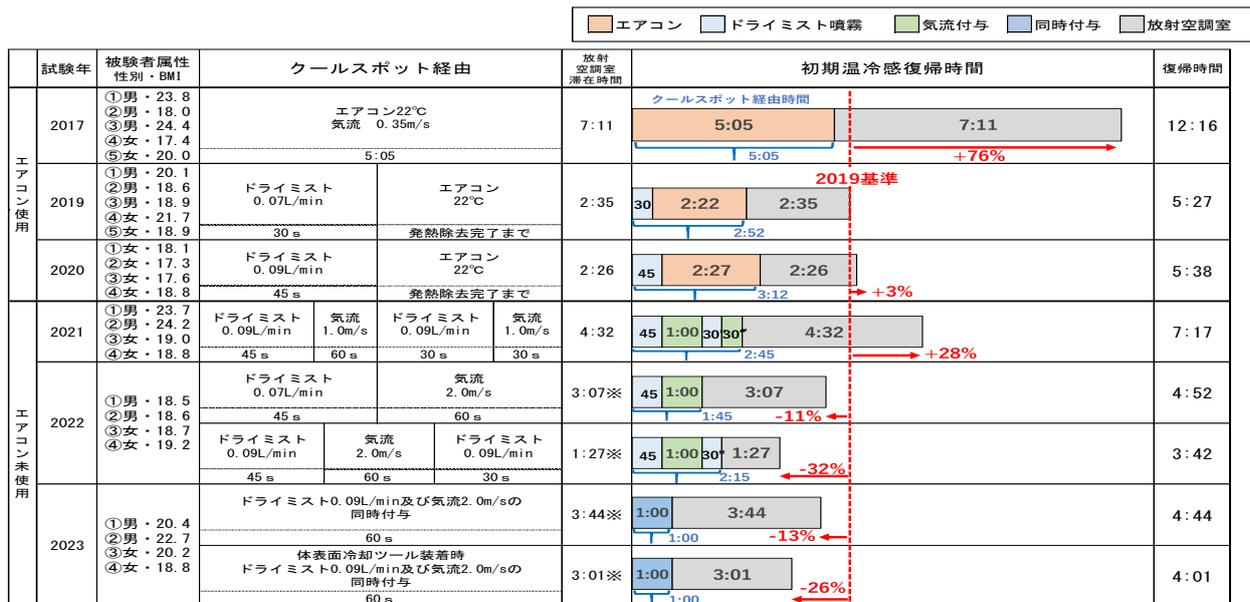


図9 初期温冷感復帰時間の垂水研究室先行研究との比較

3.5 先行研究との比較

図9に初期温冷感復帰時間に関する先行研究との比較を示す。ドライミストを使用しないエアコン単独(22°C、0.35m/s)の2017年クールスポット形成クールダウンでは、初期温冷感復帰時間に12分16秒を要していた。

2019年度のドライミスト+エアコン併用クールスポット形成では、初期温冷感復帰時間の短縮が進み、最短の試験ケースで5分27秒となったが、依然としてエネルギー消費の大きいエアコンが試験条件に含まれていた。

2021年度以降は、エネルギー消費がエアコンと比較して1%にも満たないドライミスト噴霧と気流によるクールスポット形成下での初期温冷感復帰時間の短縮効果を追究した。これまでに最短の、2022年の3分42秒という初期温冷感復帰時間は、外出行動後にドライミスト曝露、気流曝露、もう1回ドライミスト曝露を経由するという試験条件により得られたものである。これに比較して2023年度本研究の体表面冷却ツールを装着しないドライミストと気流の同時付与では、初期温冷感復帰時間が4分44秒と、2022年の結果よりも1分ほど時間が伸びている。しかし、放射空調室外のクールスポット滞在時間の点でみると、2022年の試験条件では2分15秒であるのに対し、2023年の同時付与では1分で済んでおり、執務空間の放射空調室に早期に戻れるという意味では、オフィスワーカーにとって一つの選択肢になるものと考えられる。

4. まとめ

- 1) クールスポット形成条件として新たに適用したドライミスト噴霧及び気流の同時付与は、2口吹出・2.0m/sの試験ケースでは、別々付与の初期温冷感復帰時間6分6秒と比較して1分22秒短い4分44秒となった。他の試験ケースにおいても同時付与は別々付与と比較して、1分34秒から1分59秒の間で短縮されていることから、同時付与による人体冷却効果が認められた。
- 2) 体表面冷却ツールを装着することにより、同時付与2口吹出・2.0m/sのケースでは、初期温冷感復帰時間が4分44秒から4分1秒へと43秒短縮された。熱画像からも体表面冷却ツ

ール装着による人体表面温度低下が確認された。また、冷却ツール装着時においては、試験条件の別々付与では短縮効果が限定的で(試験4ケースの平均短縮時間37秒)、同時付与によってはじめて短縮効果が発揮される(試験4ケースの平均短縮時間1分47秒)ことも見出された。

- 3) 先行研究の中で、クールスポットにエアコンとドライミストを適用した2019年の試験ケースのうち、最短の初期温冷感復帰時間は5分27秒であった。本年度の試験では冷却ツールの装着・未装着によらず、ドライミスト噴霧と気流の同時付与による試験8ケース全てにおいてこの5分27秒を下回っており、同時付与条件でのクールスポット形成により、エアコン使用の必要性がないことを明確にした。

謝辞

本研究の一部は、日本学術振興会・科学研究費補助金20K04818「放射空調オフィスのドライミスト噴霧を含むクールスポット温熱環境設定に関する研究」により実施したことを付記する。また、2023年度にこのテーマで卒業研究に取り組み、夏期被験者試験に従事して成果をまとめた石川心之介君(YKKap)、岡澤美緒君(清水建設・設備設計)、舟田昂平君(金沢市役所)、横山しえり君(前橋市役所)に感謝の意を表します。

参考文献

1. 垂水弘夫、小池怜奈、塩谷正樹、岩瀬和夫：放射空調オフィス・クールスポットへのドライミスト適用効果に関する研究、ドライミスト曝露と気流付与エリアによるクールスポット構成、日本建築学会技術報告集、第29巻第71号、pp.269-274、2023.2
2. 垂水弘夫、小池怜奈、塩谷正樹、岩瀬和夫：放射空調オフィスにおけるクールスポット設定に関する研究、ドライミスト曝露時間延長の検討、日本建築学会技術報告集、第28巻第68号、pp.308-313、2022.2
3. 垂水弘夫、小池怜奈：放射空調オフィスにおけるクールスポット設定に関する研究、ドライミストエリア併設効果の検証、日本建築学会技術報告集、第27巻第66号、pp.773-778、2021.6
4. 垂水弘夫、服部恭努：放射空調オフィスにおけるクールスポットの温熱環境設定に関する研究、WELL認証を意識したフィットネスへの対応、日本建築学会技術報告集、第25巻第61号、pp.1173-1178、2019.10
5. 垂水弘夫、服部恭努：放射空調オフィスにおけるクールスポットの有効性評価に関する研究、被験者試験を通じた滞在時間・温熱環境条件の検討、日本建築学会技術報告集、第25巻第59号、pp.261-266、2019.2