

1.3 測定項目

1) 温熱環境

表2に示す項目について日向、既設テント、暑熱対策施設及び空調室内を測定した。

表2 温熱環境の測定項目

測定項目	測定機材	測定間隔
乾球温度	乾球温度計（強制通風）	1秒
相対湿度	湿度計	1秒
風速	2次元及び3次元超音波風速計	1秒
黒球温度	黒球温度計	1秒
白球温度	白球温度計	10秒
長波・短波放射量	長短波放射収支計	10秒
熱画像	サーモカメラ	適宜

2) 生理反応

心拍数は、心拍計を用いて1秒毎に記録した。

皮膚温度は、7点の皮膚温度を10秒ごとに記録した。

発汗量は、精密体重計で体重減少量を測定した。

3) 主観申告

下記の項目について、実験中、5～10分毎に申告させた。

- ・温冷感：9段階
- ・快適感：7段階
- ・気流感：6段階
- ・発汗度：5段階
- ・Tシャツの濡れ感：4段階（屋外のみ）
- ・許容度：4段階
- ・満足度：4段階

1.4 評価方法

1) グラフ等の凡例記号

5名の被験者は匿名化し、A、B、C、D、Eとした。

屋外着座時の環境条件として、日向は「sun」、既設テントは「tent」、暑熱対策施設は「mist」とした。また、参考として日向歩行前の空調室は「room」として表記した。

実験時刻の違いは、11：50からの1回目の実験を「1」、14：25からの2回目を「2」とした。

表3 各被験者の実験条件と実施日

	7月27日		7月28日		7月29日		7月30日	
	1回目	2回目	1回目	2回目	1回目	2回目	1回目	2回目
A	A_sun_1	A_mist_2	-	-	A_mist_1	A_tent_2	-	-
B	B_mist_1	B_sun_2	B_tent_1	B_tent_2	B_sun_1	B_mist_2	-	-
C	C_tent_1	C_tent_2	-	-	-	-	C_sun_1	C_mist_2
D	-	-	D_sun_1	D_mist_2	-	-	D_mist_1	D_tent_2
E	-	-	E_mist_1	E_sun_2	E_tent_1	E_sun_2_2	-	-

2) 熱環境の把握方法

気温については、強制通風筒内の Pt100 センサーによる測定値を基本とし、ミストファン下ではセンサーが濡れている可能性が考えられたため、3次元超音波風速計の音仮温度を用いた。

MRT については、ISO7726 の黒球温度等からの算出を基本とし、ミストファン下では一部で黒球が濡れている可能性が考えられたため、部分的に上下2方向の長短波放射量から算出¹した。

SET*については、2ノードモデルにより計算した。入力に用いた身長、体重等は各被験者の値を用い、着衣量は半袖長ズボンとして 0.43clo、着座時の代謝量は 1 met とした。屋外着座時の SET*は、着座していた 15 分間の平均値とした。

3) 生理量の把握方法

①心拍数

着座時の心拍数は、着座終了前5分間の平均値とした。

評価に用いた指標は、相対心拍増加率 (%HRR) として、ベースとなる心拍数と最大心拍数で以下のように基準化した。

$$\%HRR = (\text{着座時心拍数} - \text{ベース心拍数}) / (\text{最大心拍数} - \text{ベース心拍数}) \times 100$$

ベース心拍数は、運動開始前の室内着座時の安定した 15 分間の平均値とした。

最大心拍数は、 $220 - \text{被験者年齢}$ として推定した。

②皮膚温

着座時の皮膚温は、着座終了前5分間の平均値とした。

③発汗量

発汗量は、運動開始前の体重と屋外着座終了後の体重との差を計算し、体表面積当たり、時間当たりの発汗量として評価した。

4) 主観申告の把握方法

屋外着座時の主観申告は、着座終了時の最終申告を採用した。

¹ 渡邊ほか,屋外における平均放射温度の算出法の比較,日本建築学会大会学術講演梗概集(環境工学 II), 357-358, 2013

1.5 測定結果

1) 熱環境の測定結果

日向、仮設テント、暑熱対策施設の熱環境の測定結果を示す。

実験期間の気温は、30~34℃程度となっていた。

日向と既設テントの気温には大きな差は見られず、暑熱対策施設はミスト噴霧時に日向にくらべて平均で1℃程度、低くなっていた。逆に湿度は平均5%程度、高くなっていた。

風速は、日向にくらべて既設テントで若干、弱くなっており、暑熱対策施設ではファン稼働時に日向より1 m/s程度、強くなっていた。

ミストファン稼働時のMRTは、日向の平均が67.1℃、既設テントが44.5℃、暑熱対策施設は42.0℃であった。

同じくSET*は、日向の平均が37.5℃、仮設テントが32.6℃、暑熱対策施設は29.1℃であった。

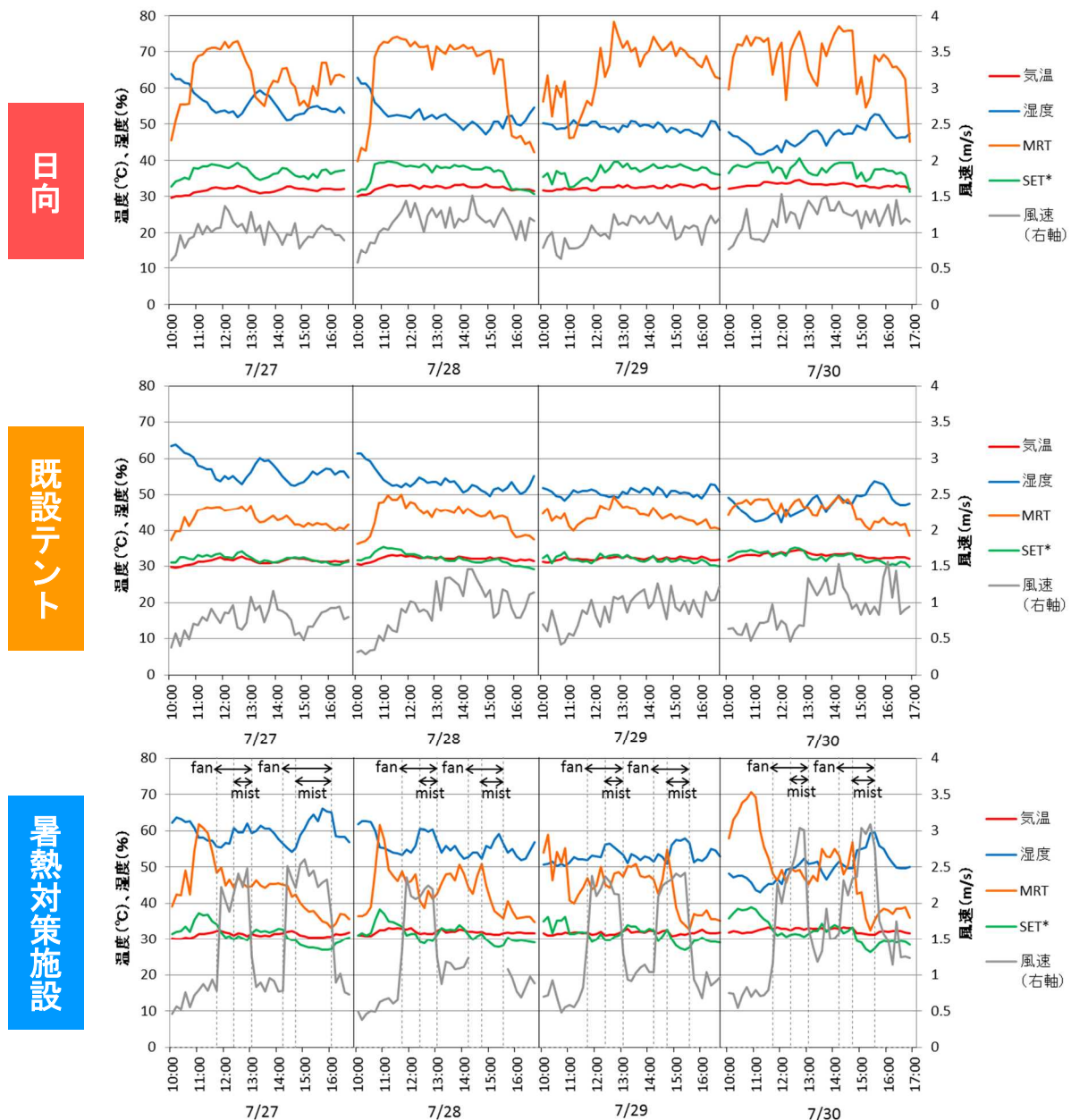


図3 実験期間の熱環境の比較 (条件ごと)

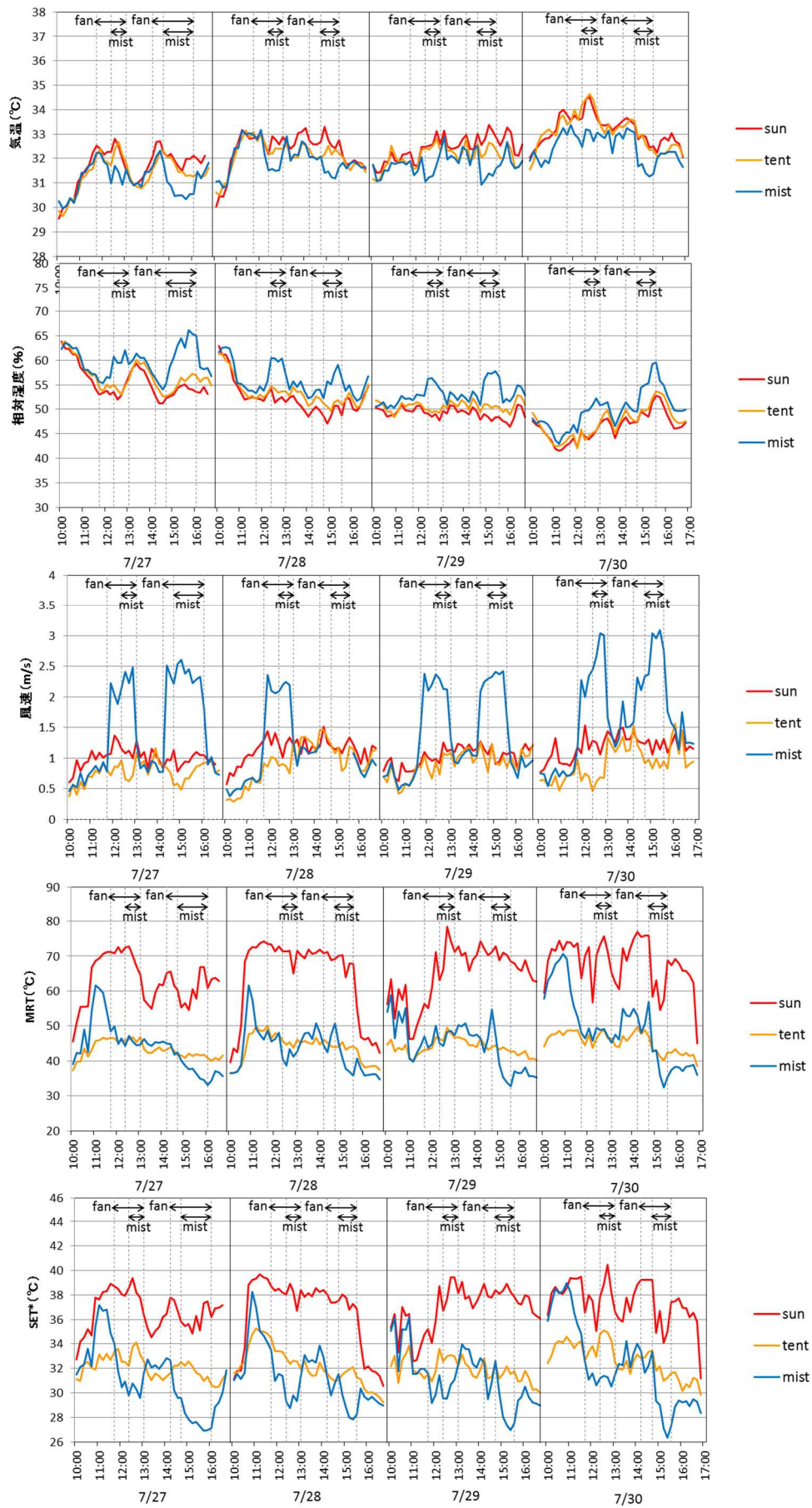


図4 実験期間の熱環境の比較 (熱環境要素ごと)

2) 生理反応の測定結果

(1) 心拍数の測定結果

相対心拍増加率は、日向歩行時に 10~40%程度、上昇し、屋外着座時には低下して 0~15%程度となっていた。

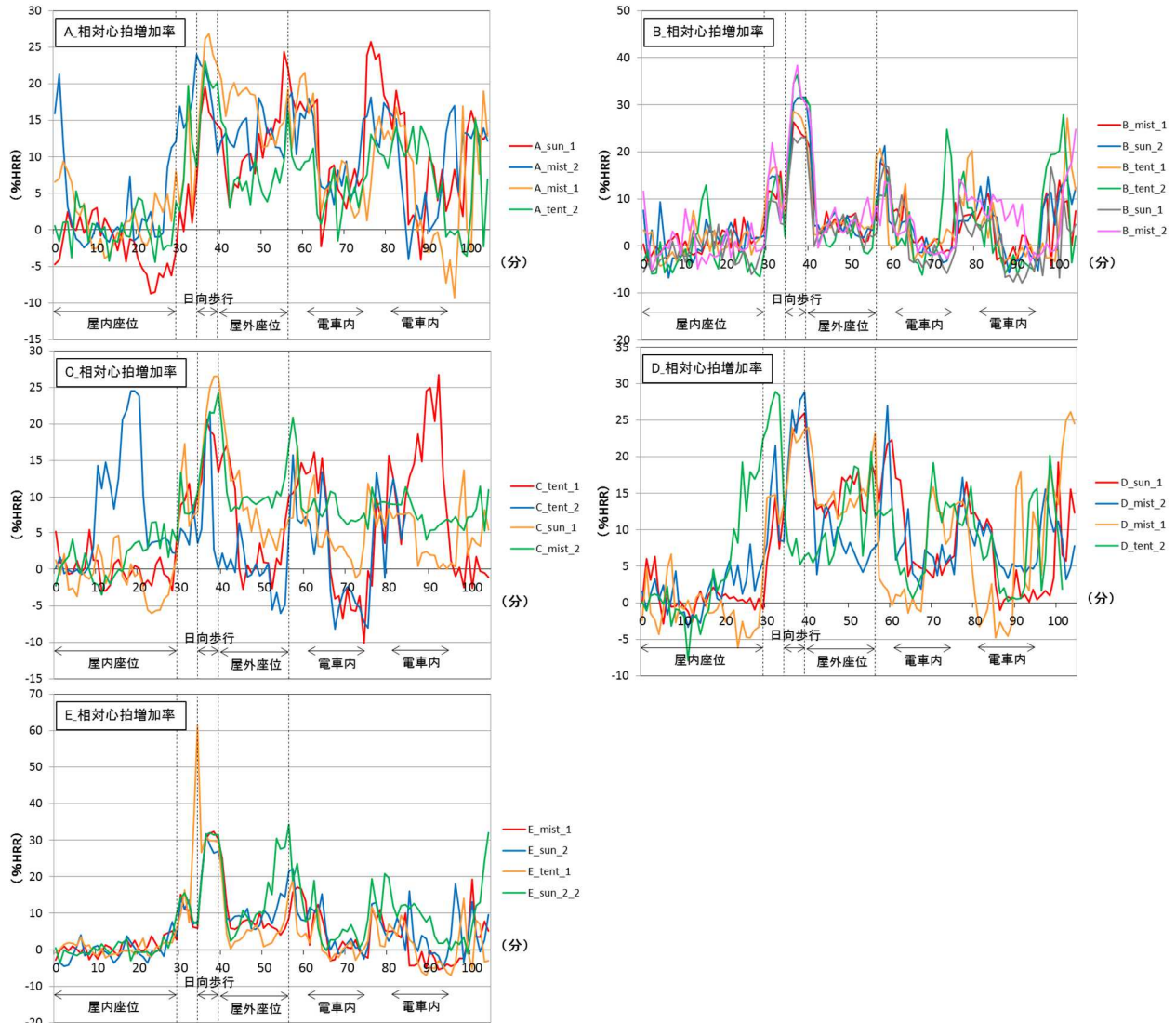


図5 各被験者の心拍数の推移

屋外着座時の相対心拍増加率を SET*との関係で見ると、既設テント下の相対心拍増加率は低くなっているものの、暑熱対策施設は5~15%程度と日向と同程度となっていた。

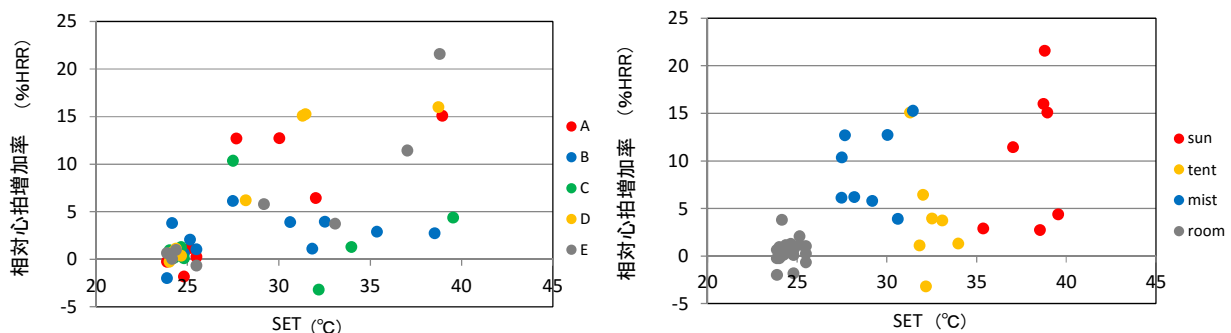


図6 被験者ごと (左) と条件ごと (右) の SET*と相対心拍増加率の関係

騒音や風速の増加は、交感神経を亢進させることが指摘されており²、ミストファンによる騒音や風、着座位置背後の自動車走行などが心拍数の増加に影響した可能性が考えられる。

(2)皮膚温

7点法による平均皮膚温は、日向歩行時に上昇し、その後、屋外着座時には日向ではさらに上昇し、既設テントでは横ばい、暑熱対策施設では低下する傾向が見られた。

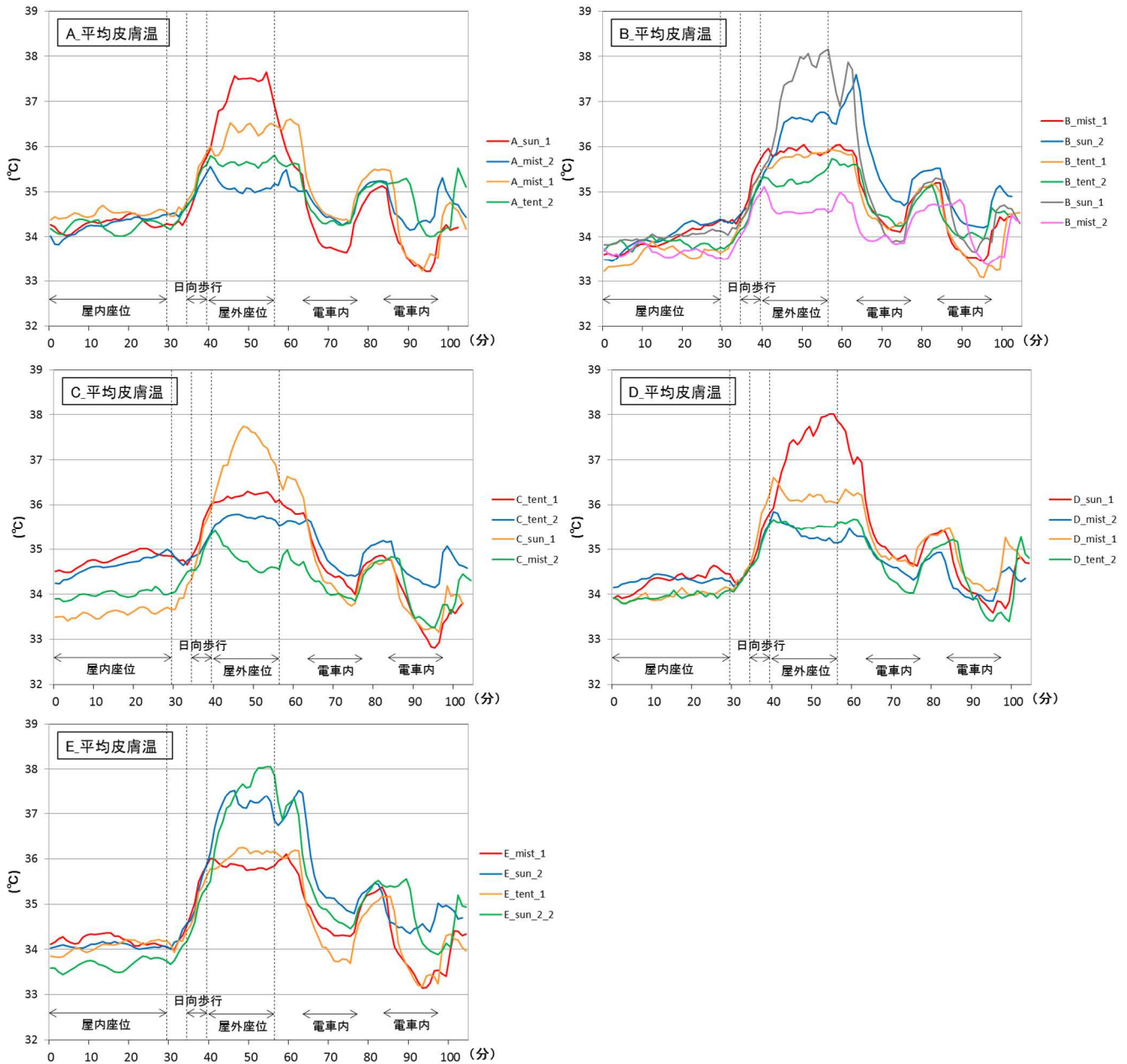


図7 各被験者の平均皮膚温の推移

屋外着座時の平均皮膚温と SET*との関係を見ると、SET*が高くなると平均皮膚温も高くなる傾向が見られるが、SET*30°C前後での既設テントと暑熱対策施設での平均皮膚温の変化には

² 永吉 英記ら、環境変化と心臓自律神経活動との関連、国士館大学体育研究所報、Vol.21 (2003)

連続性が見られない (図8 右 赤色破線で囲った)。ここで示している SET*はミストファンによる効果が最も高い被験者の上半身の局所的な熱環境であり、被験者の全身がさらされている温熱環境を示していないことが影響していると考えられる。

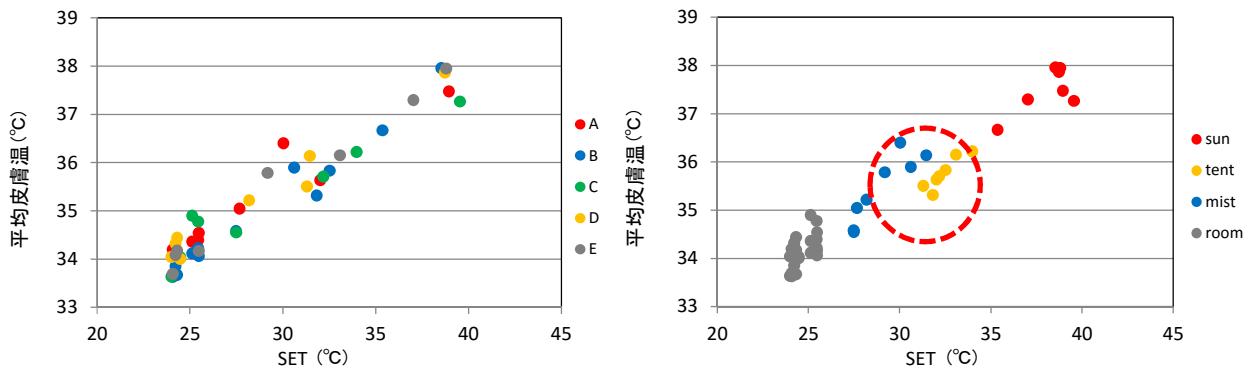


図8 被験者ごと (左) と条件ごと (右) の SET*と平均皮膚温度の関係

そこで、ミストファンに直接、当たっている上腕の皮膚温と SET*との関係をプロットすると、より直線的な関係性が見られた。

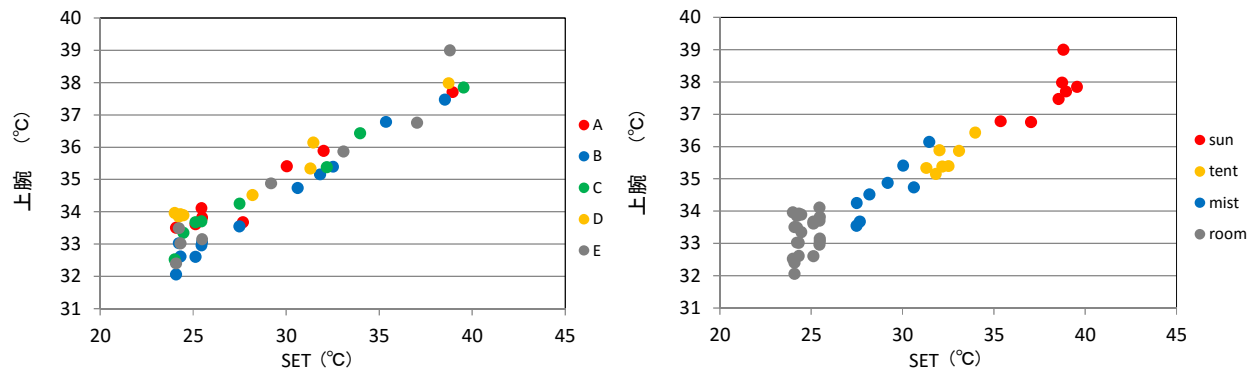


図9 被験者ごと (左) と条件ごと (右) の SET*と上腕皮膚温度の関係

(3)発汗量

日向歩行及び屋外着座時の発汗量は、 $20\sim 100\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{hr})$ となっており、屋外着座時の SET*が高くなるほど発汗量が多くなる傾向が見られた。

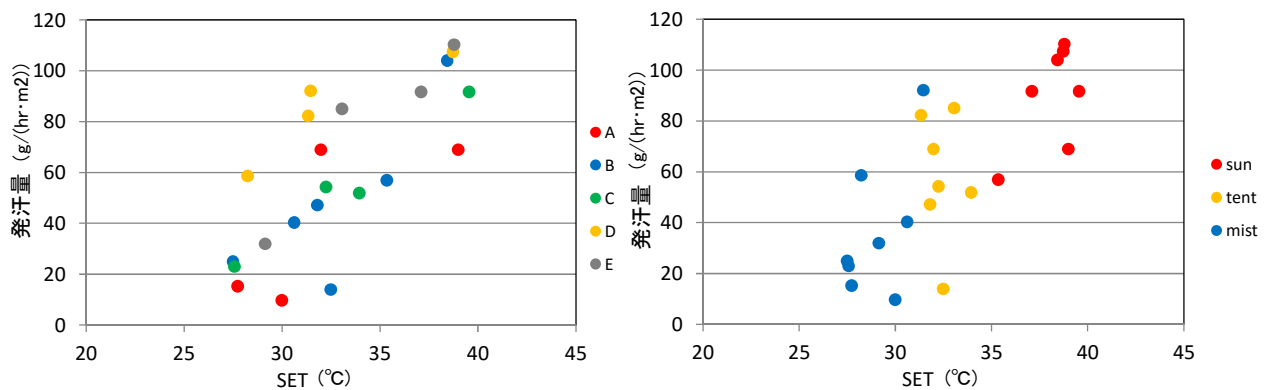


図10 被験者ごと (左) と条件ごと (右) の SET*と発汗量の関係

3) 主観申告の測定結果

主観申告として、温冷感、快適感、許容度、満足度と SET*との関係を示した。

いずれの指標でも SET*との直線的な関係性が見られ、ミストファンが局所的な温熱環境の改善にもかかわらず、被験者の全身の申告を改善する効果が見られた。

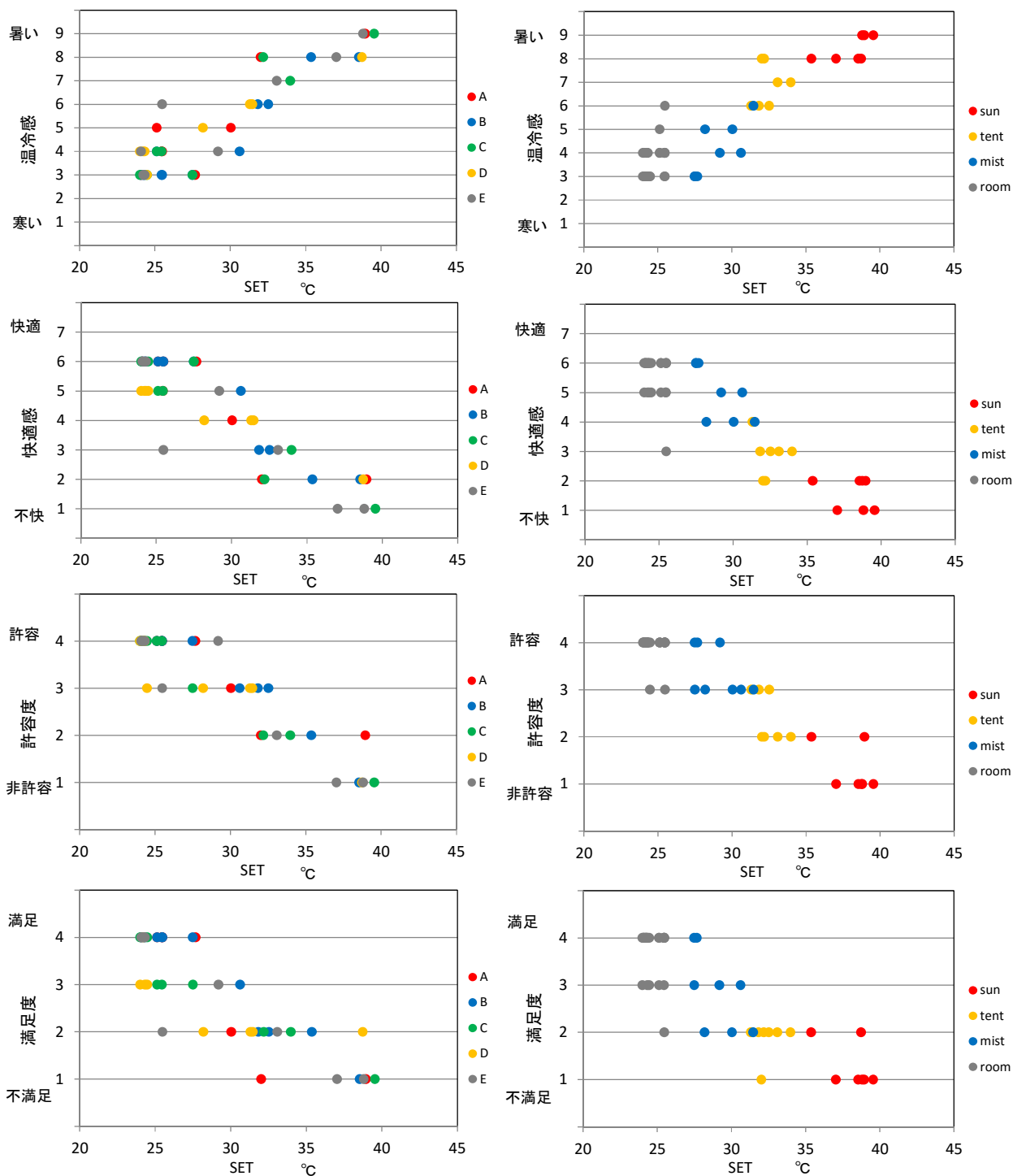


図 11 被験者ごと (左) と条件ごと (右) の SET*と主観申告の関係

4) 皮膚温と主観申告の関係

① 温冷感

平均皮膚温と温冷感との関係を見ると、暑熱対策施設のデータで、平均皮膚温が 36°C 程度にもかかわらず「涼しい」側の申告になっており、暑熱対策施設のプロット位置が右側にずれる傾向が見られる (図 12 右 赤色破線で囲った)。

そこで、ミストファンに直接、当たっている上腕の皮膚温度との関係でプロットすると、温冷感とのより直線的な関係がより良好になった (図 13 右 赤色破線で囲った)。

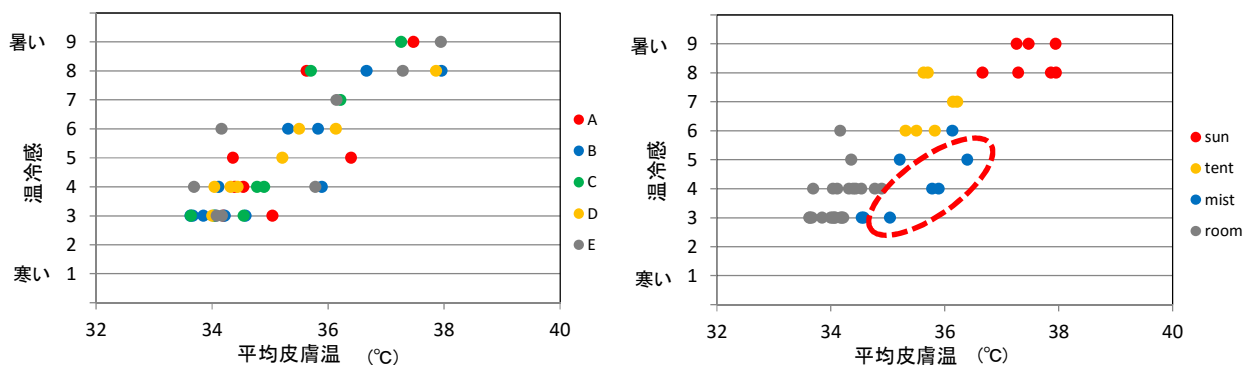


図 12 被験者ごと (左) と条件ごと (右) の平均皮膚温と温冷感の関係

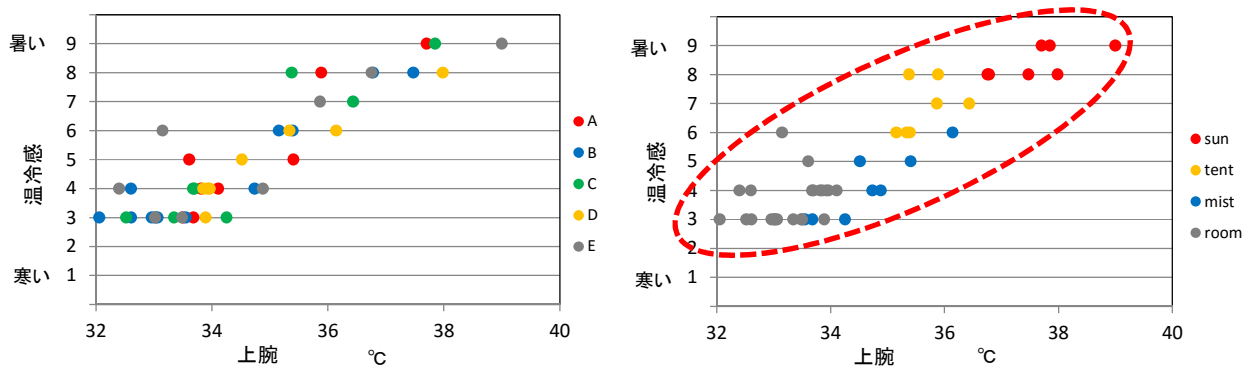


図 13 被験者ごと (左) と条件ごと (右) の上腕温度と温冷感の関係

②快適感

快適感についても同様に、平均皮膚温と上腕の皮膚温度との関係を見ると、平均皮膚温より上腕との関係性が良好であった。

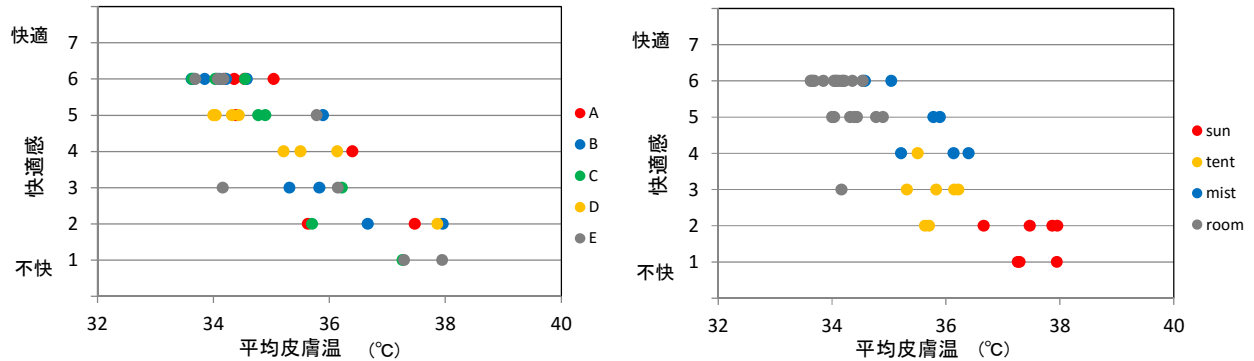


図 14 被験者ごと（左）と条件ごと（右）の平均皮膚温と快適感の関係

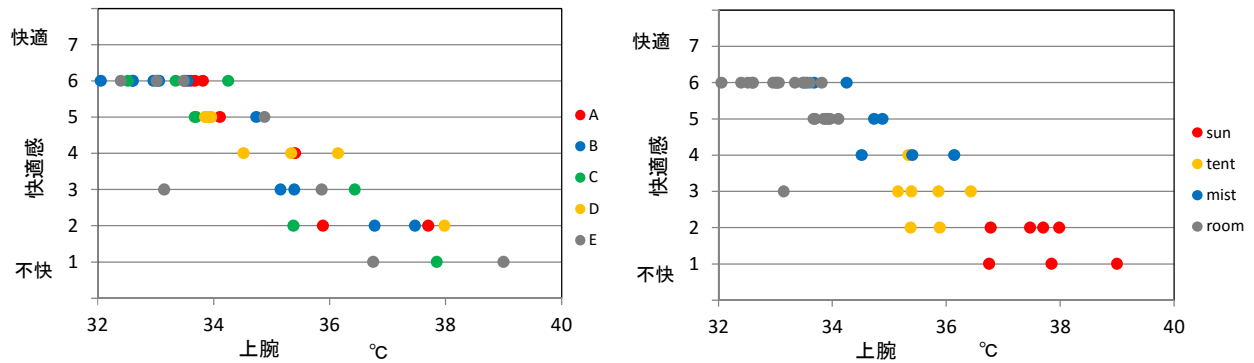


図 15 被験者ごと（左）と条件ごと（右）の上腕温度と快適感の関係

1.6. まとめ

今回の実験で対象とした暑熱対策施設のうち、温熱環境の改善効果が高いミストファンについては、ファンによる風向の制御により、局所的に温熱環境を改善するものである。実験の際にはミストファンの涼風が被験者の上半身に吹き付けるよう調整されていた。暑熱対策施設のミストファンの涼風にばく露した部分の SET*は、日向にくらべて 8~10°C 程度、既設テントにくらべても 3~4°C 程度、低下していた。

結果は、生理反応としての心拍数の変化は、日向より既設テントで上昇が抑制されていたものの、ミストファンばく露時には既設テントより上昇率が高くなっていた。今回の実験では騒音レベルを測定していないため定量的な評価はできないが、ミストファンの音や風が自律神経系に作用し、心拍数を上昇させた可能性が考えられた。

皮膚温については、ミストファンの影響を受けやすい上腕部の皮膚温と、ミストファンの影響を受けた局所的な SET*との関係性が良好であった。しかし、局所的な SET*と全身皮膚温との関

係性には開きが見られた。

主観申告については、局所的な対策にもかかわらず、全身の温冷感や快適感が大きく改善した。既往の知見からも、身体表面に不均一温熱刺激を与えた実験において、上腕部の皮膚温が全身温冷感を支配する重要な因子であることが指摘されている³。また、頸部の冷却は、皮膚表面近くの内部血流量が大きく、40分間ばく露後の全身皮膚温の低下効果や全身温冷感の改善効果が高いとも指摘されている⁴。

綾ノ町電停の暑熱対策施設は、路面電車のホームという土地面積の制約が厳しい場所に設置したものである。そこで、ミストファンという局所的な冷却手法を用いたが、人の温冷感の特性や体温調節機能等を考慮して設計することで、有効な対策が実施できることが示された。

³ 丸山,田村, 不均一温熱刺激に対する皮膚温・温冷感反応, 日本生気象学会雑誌, Vol. 26 (1989) No. 3 P143-154

⁴ 西原, 長谷部, 局所冷刺激に対する人体反応特性の部位差, 日本生気象学会雑誌, Vol. 39 (2002) No. 4 P107-120

2. ミストファンにより着衣や皮膚が濡れることを想定した被験者実験（屋内）

2.1 概要

綾ノ町の実験では、ミストによる人体と衣服の濡れが確認できなかったので、学内にて綾ノ町で行った実験と同様の実験を屋内で行う。それによって、人体と衣服がミストによって、濡れる場合の被験者の生理反応および心理反応を調査し、ミストファンの効果を検証する。

この実験は、大阪市立大学工学研究科地域環境計画研究室にて実施した。

2.2 実施期間

2016年12月28日 [条件1] と 2017年1月6日 [条件2]

2.3 実施場所

大阪市立大学理学部棟 C202B (6.25×7.00×3.68[m])

2.4 被験者

20歳代の健康な男子1名（綾ノ町での被験者Aと同一被験者）

表 1 被験者Aの身長と体重

被験者情報	
身長[m]	1.71
体重[kg]	57.0

2.5 実験計画

ミストファン装置を用いて、[条件1] ミスト+ファン（ノズル2つの噴霧量4.73[l/h]）と [条件2] ファンのみ（ミストなし）の2パターンで、被験者の生理反応、心理反応の違いを調べる。またTシャツとズボンの重量を計測し、ミストの付着量を把握する。

【実験手順】

11:00より実験を開始し、30℃に設定された空調機で暖房された室内（全熱交換換気扇の「強」設定）で30分間着座後、Tシャツとズボンの重量を計測する。その後、[条件1]または[条件2]で30分間着座し、Tシャツとズボンの重量を計測する。これを1セットとし、1日に2セットずつ行った。実験の流れを図に、図～図に実験室の図面、位置関係、写真を示す。図、図に実験スケジュールを示す。



図1 実験の流れ

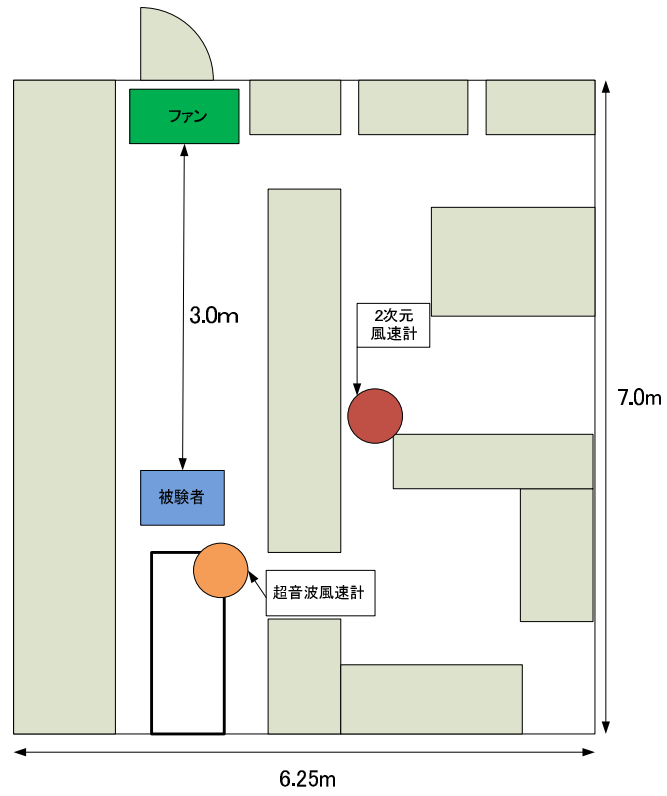


図2 C202B 実験室の配置図

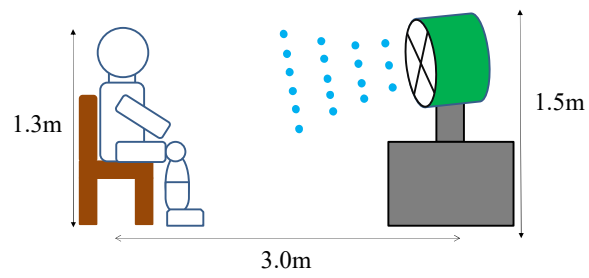


図3 被験者とファンの関係図

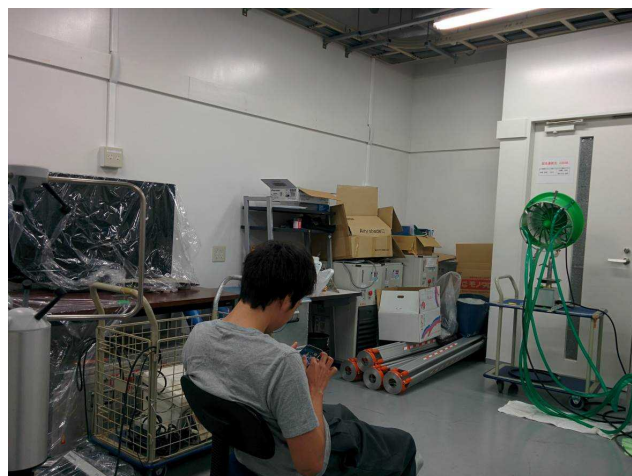


図4 実験の様子

時刻	被験者の状態	アンケート回答 タイミング	時刻	被験者の状態	アンケート回答 タイミング		
11:07	空調室での 座位	◎	12:40	空調室での 座位	◎		
11:08			12:41				
11:09			12:42				
11:10			12:43				
11:11			12:44				
11:12			12:45				
11:13			12:46				
11:14			12:47				
11:15			12:48				
11:16			12:49				
11:17			◎		12:50	◎	
11:18					12:51		
11:19					12:52		
11:20					12:53		
11:21					12:54		
11:22					12:55		
11:23					12:56		
11:24					12:57		
11:25					12:58		
11:26					12:59		
11:27			◎		13:00	◎	
11:28					13:01		
11:29					13:02		
11:30					13:03		
11:31					13:04		
11:32					13:05		
11:33					13:06		
11:34					13:07		
11:35					13:08		
11:36			◎		13:09	◎	
11:37		重量計測			13:10	重量計測	
11:38					13:11		
11:39					13:12		
11:40		ミスト噴霧下 座位	◎		13:13	ミスト噴霧下 座位	◎
11:41					13:14		
11:42					13:15		
11:43			13:16				
11:44			13:17				
11:45			13:18				
11:46			13:19				
11:47			13:20				
11:48			13:21				
11:49			13:22				
11:50			◎	13:23	◎		
11:51				13:24			
11:52				13:25			
11:53				13:26			
11:54				13:27			
11:55				13:28			
11:56				13:29			
11:57				13:30			
11:58				13:31			
11:59				13:32			
12:00			◎	13:33	◎		
12:01				13:34			
12:02				13:35			
12:03				13:36			
12:04			13:37				
12:05			13:38				
12:06			13:39				
12:07			13:40				
12:08			13:41				
12:09		◎	13:42	◎			

図5 [条件1]の実験スケジュール

時刻	被験者の状態	アンケート回答 タイミング	時刻	被験者の状態	アンケート回答 タイミング	
11:00	空調室での 座位	◎	12:35	空調室での 座位	◎	
11:01			12:36			
11:02			12:37			
11:03			12:38			
11:04			12:39			
11:05			12:40			
11:06			12:41			
11:07			12:42			
11:08			12:43			
11:09			12:44			
11:10			◎		12:45	◎
11:11					12:46	
11:12					12:47	
11:13					12:48	
11:14					12:49	
11:15					12:50	
11:16					12:51	
11:17					12:52	
11:18					12:53	
11:19					12:54	
11:20			◎		12:55	◎
11:21					12:56	
11:22					12:57	
11:23					12:58	
11:24					12:59	
11:25					13:00	
11:26					13:01	
11:27					13:02	
11:28					13:03	
11:29		◎	13:04	◎		
11:30	重量計測		13:05	重量計測		
11:31			13:06			
11:32			13:07		◎	
11:33	ミスト噴霧下 座位	◎	13:08	ミスト噴霧下 座位		
11:34			13:09			
11:35			13:10			
11:36			13:11			
11:37			13:12			
11:38			13:13			
11:39			13:14			
11:40			13:15			
11:41			13:16			
11:42			13:17		◎	
11:43			◎		13:18	
11:44					13:19	
11:45					13:20	
11:46					13:21	
11:47					13:22	
11:48					13:23	
11:49					13:24	
11:50					13:25	
11:51					13:26	
11:52					13:27	◎
11:53			◎		13:28	
11:54					13:29	
11:55					13:30	
11:56					13:31	
11:57			13:32			
11:58			13:33			
11:59			13:34			
12:00			13:35			
12:01			13:36			
12:02		◎	13:37	◎		

図6 [条件2]の実験スケジュール

2.6 計測項目

1) 生理反応

被験者の生理反応として以下の項目を測定する。

表2 生理反応の測定項目

測定項目	測定機材	測定間隔
皮膚温（7点）	携帯型精密温度計 GRAM株式会社 LT-200SA	1秒
Tシャツなどの重量	精密体重計	適宜

2) 心理反応

被験者の主観申告により以下の項目を測定する。なお、質問票は「日本建築学会環境基準温熱心理・生理測定法基準・同解説」等にもとづき作成する。

表3 主観申告の測定項目

測定項目	尺度	測定間隔
温冷感	9段階	適宜
快適感	7段階	
発汗感	4段階	
受容度	4段階	

3) 熱環境

温熱環境の測定として、以下の項目を測定する。

表4 温熱環境の測定項目

測定項目	測定機器	測定間隔
気温(ミスト外の環境)	強制通風式乾球温度計	1秒
相対湿度(ミスト外の環境)	湿度計	
風速(ミスト外の環境)	2次元超音波風速計	
黒球温度(ミスト外の環境)	黒色グローブ温度計	
気温(ミスト内の環境)	3次元超音波風速計	1秒
風速(ミスト内の環境)		

2.7 実験結果

2.7.1 SET*の算出条件

結果として、SET*を算出するための設定条件について表に示す。

表5 各設定条件

設定条件				
体重[kg]	体表面積[m ²]	着衣量[clo]	代謝量[W/m ²]	外部仕事[W/m ²]
57	1.66	0.43	58.2	0

2.7.2 [条件1]ミストファンの結果

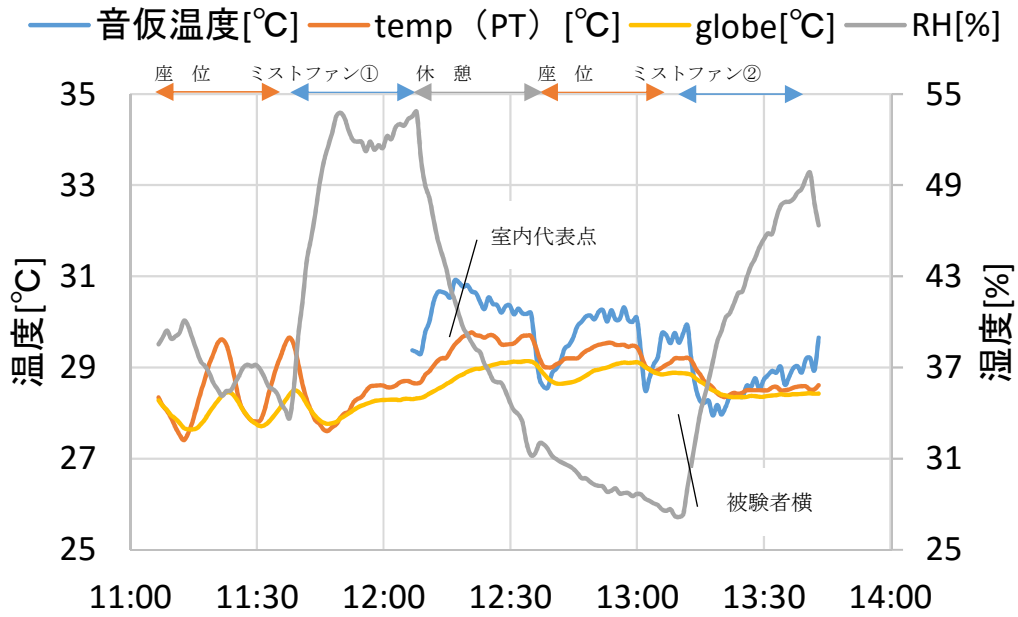


図1 [条件1]の環境データ

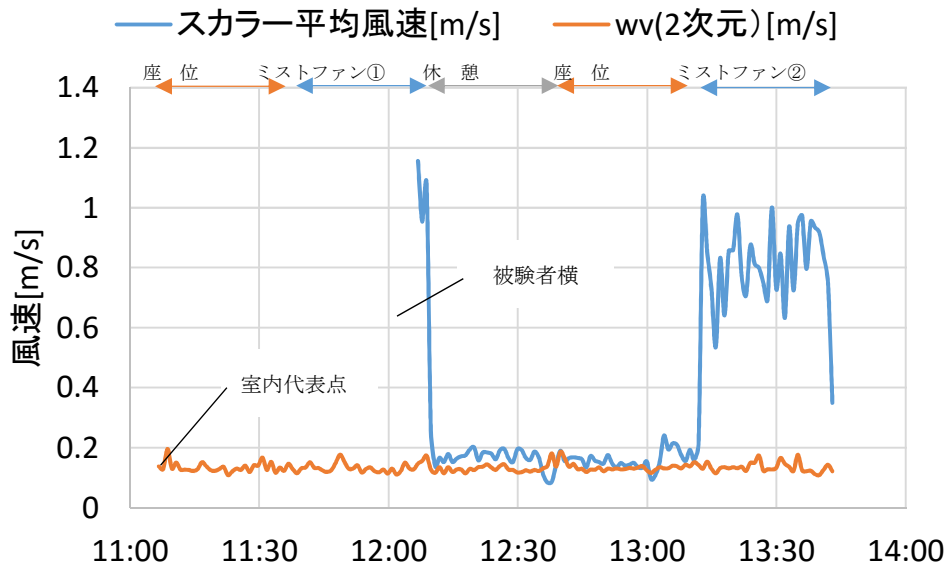


図8 [条件1]の風速データ

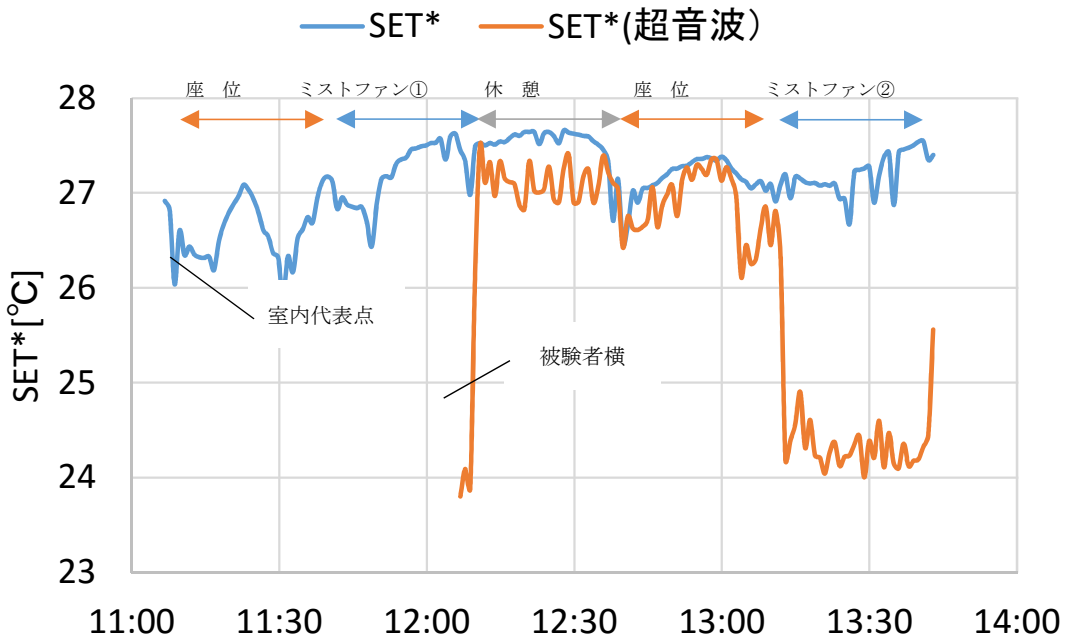


図9 SET*の算出結果

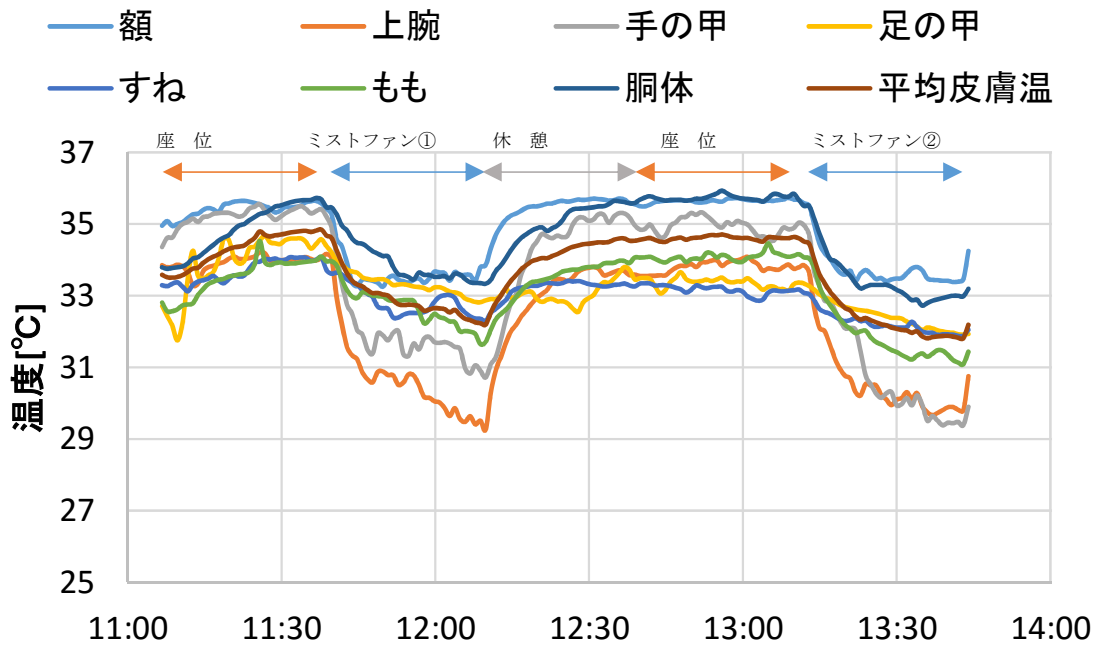


図2 [条件1]の皮膚温度データ

2.7.3 [条件2]ファンのみの結果

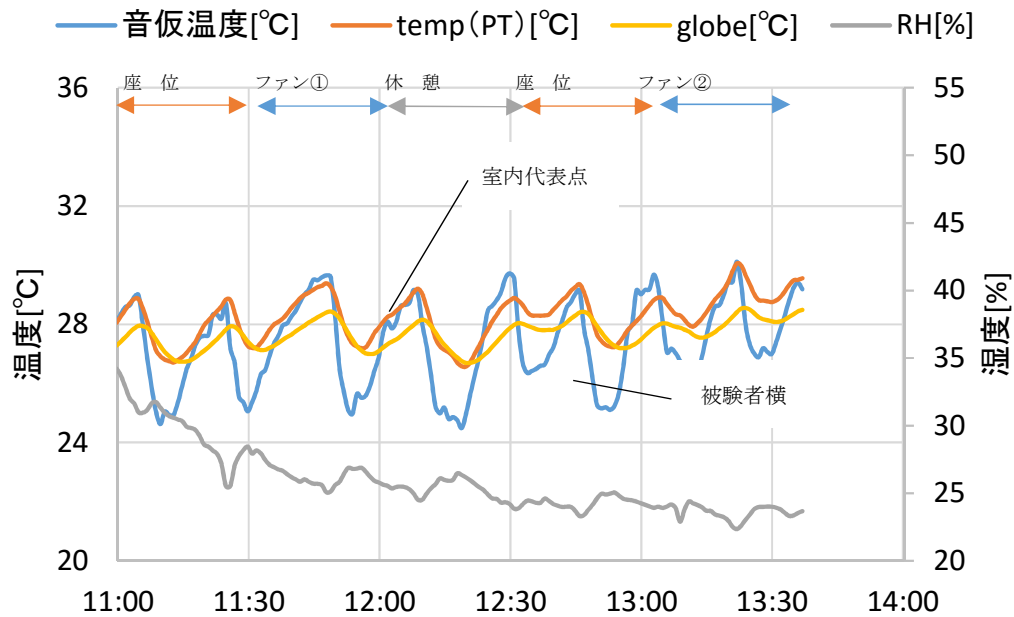


図 11 [条件2]の環境データ

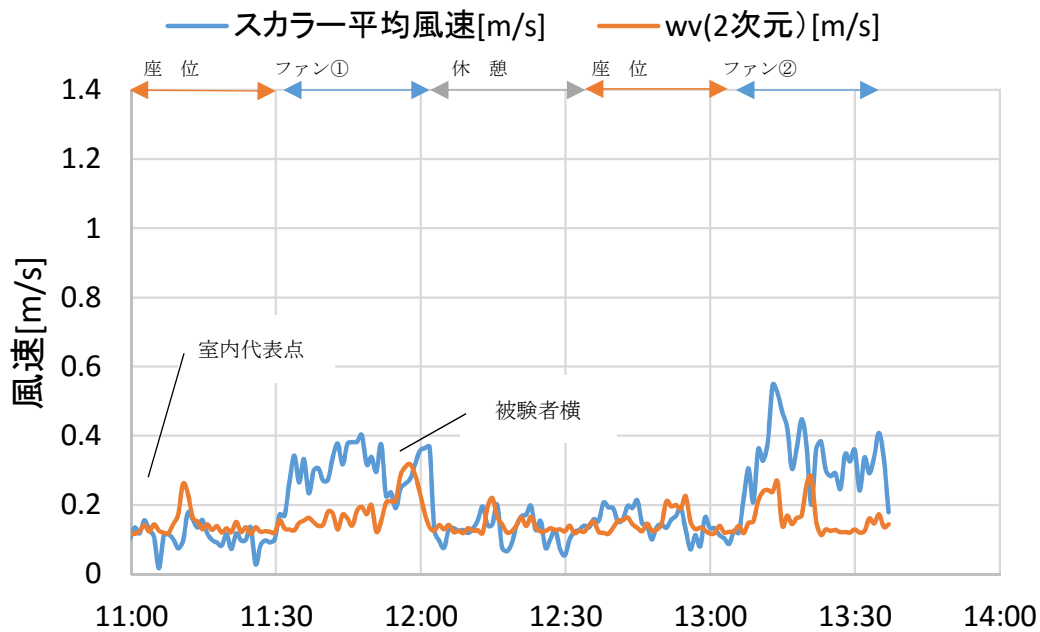


図 12 [条件2]の風速データ

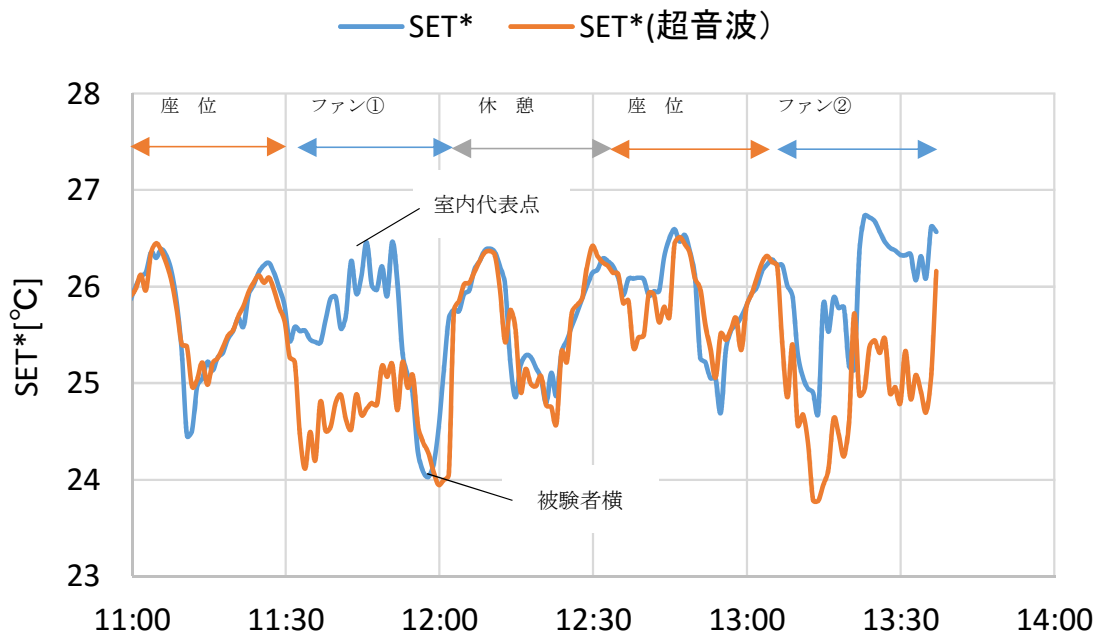


図 13 SET*の算出結果

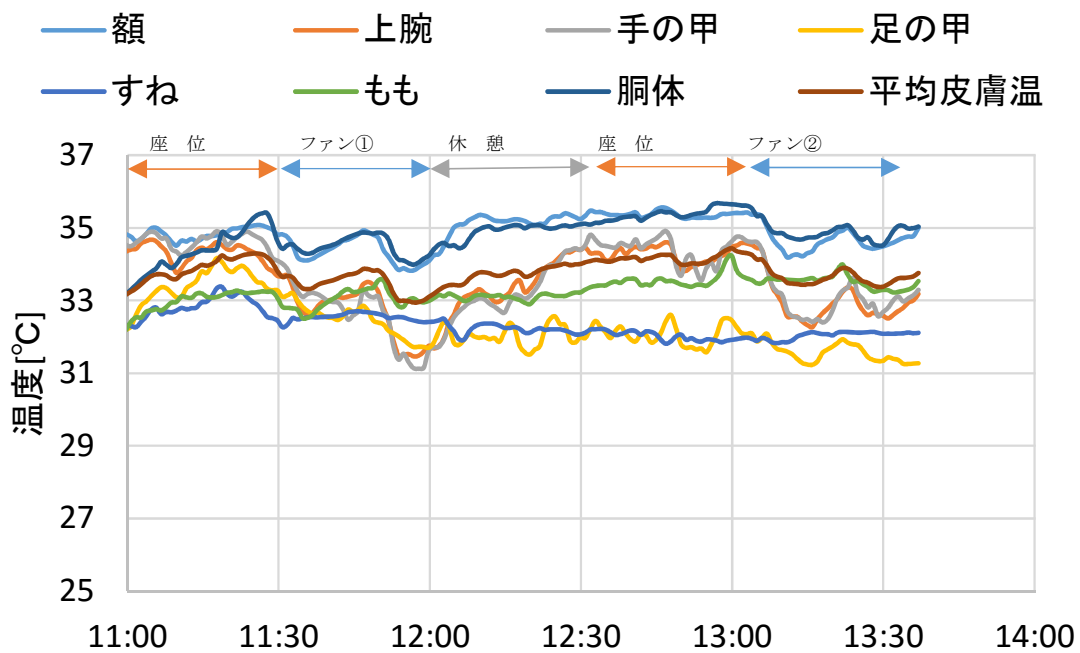


図 14 [条件 2]の皮膚温度データ

2.7.4 着衣重量計測の結果

ミスト噴霧による着衣の重量計測の結果を表に示す。実験前に着衣の重量を予め計測し、その後室内座位後とミスト噴霧後に着衣の重量をそれぞれ計測した。1回目のミスト噴霧①では、Tシャツは2g、ズボンは2g増加し、靴下は変化なしであった。2回目のミスト噴霧②では、Tシャツは1g、ズボンは4g、靴下は1g増加した。室内座位の間には重量増加がなかったことから、

発汗による増加ではなく、ミスト噴霧による増加であると考えられる。

表6 着衣重量計測の結果

		着衣重量計測の結果			
		[条件1]	Tシャツ[kg]	ズボン[kg]	靴下[kg]
1回目	着衣前		0.145	0.524	0.056
	室内座位後		0.144	0.523	0.055
	ミスト噴霧後		0.146	0.525	0.055
2回目	着衣前		0.140	0.529	0.057
	室内座位後		0.138	0.525	0.056
	ミスト噴霧後		0.139	0.529	0.057

2.8 考察

2.8.1 平均皮膚温度 (T_{sk})

各条件の被験者の実測 T_{sk} を図3左図に示す。このとき、ファン稼働時の被験者近傍の風速は、事前実験で計測した風速 1.13[m/s]を用いる。図3右図に示すようにミストファン稼働時以外のデータから求めた近似式 ($y=0.30x+26.6$) を用いると、 $SET^*=23.9^{\circ}C$ 時の平均皮膚温度=33.8 $^{\circ}C$ と推定された。ミストファン暴露時の実測 T_{sk} はこの推定値より①1.33 $^{\circ}C$ 、②1.94 $^{\circ}C$ 低いことがわかる。これは人体と着衣が濡れたことによる効果とみなすことができる。

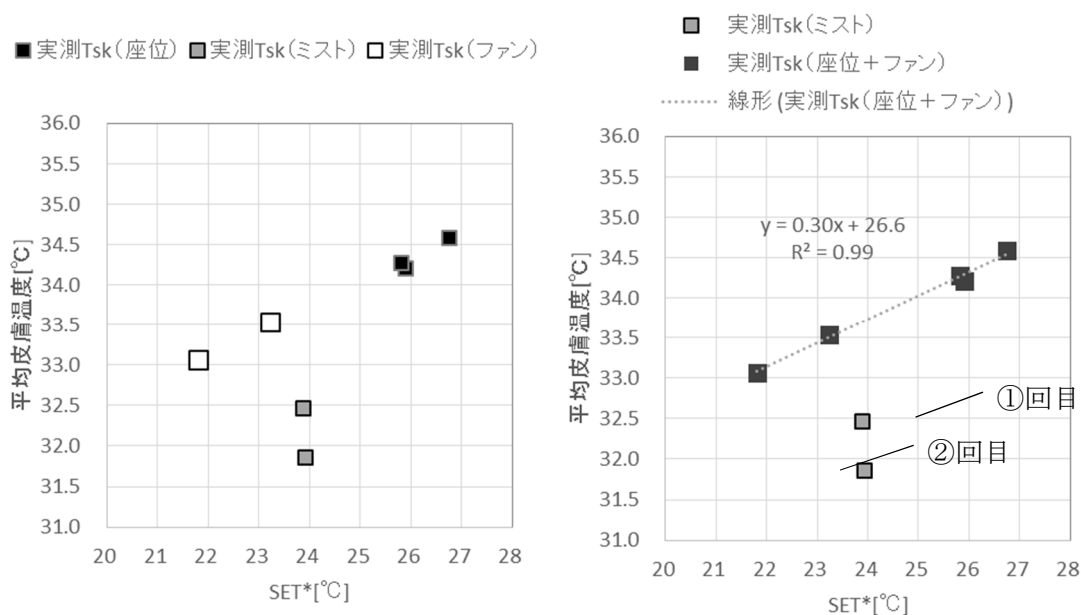


図3 SET*と各条件の平均皮膚温度の実測結果

2.8.2 主観申告への影響

ミストで被験者を濡らすことによる被験者の主観申告 (温冷感・快適感) と平均皮膚温度との関係を図4、図5に示す。図6、図7に夏季2016年7月に綾ノ町駅でおこなったミストファンの屋外実験データとの比較を示す。図4より、ミストファン暴露前の温冷感は中立からやや暑い側にあり、ミストファンに暴露されると3~4段階寒い側に、ファンのみに暴露されると中立から1~2段階涼しい側に移行している。図5より、ミストファン暴露前の快適感は中立から1段階不快側に、ファンのみに暴露されると1段階快適側に移行している。図6より、屋外実験でのミスト

ファン暴露時の平均皮膚温度は 34~37℃で、温冷感申告値は中立~涼しい側に集中している。今回の屋内実験では、ミストファン暴露前の室内座位時で平均皮膚温度が 34~35℃、ミストファン暴露時で 32~33℃となり、ミストファン暴露時の温冷感申告値は屋外実験時より寒い側の申告となった。図 7 より、屋外でのミストファン暴露時は中立~快適側の申告であるが、屋内でのミストファン暴露時はやや不快側の申告となった。

夏季の屋外実験では涼しくて快適な状態で、今回実施した冬季の屋内実験では、平均皮膚温度が 32~33℃と低く、寒くてやや不快な状態であったことがわかる。

2.9 まとめ

大型のファン付きミスト噴霧装置を用いて、屋内で被験者を用いた暴露実験をおこなった。実験室は暖房と換気をおこなっていたが、湿度はコントロールできなかったため、ミスト噴霧中の相対湿度は上昇し、ミストファン暴露中の SET*は約 24℃であった。ミストファンは被験者の上半身に向けられていたので、上腕や手の甲の皮膚温度低下が顕著にみられた。ミストファン暴露時の平均皮膚温度は 32~33℃となり、暴露開始 20~30 分間の平均皮膚温度は①回目 32.5℃、②回目 32.0℃となり、SET*24℃で濡れていないと想定した時の平均皮膚温度推定値 (33.8℃) よりそれぞれ①1.33℃、②1.94℃低くなった。この時の温冷感申告と快適感申告から、今回の屋内実験条件は、被験者にとっては寒くてやや不快な状態であった。

今後、屋外でも同様の検証実験をおこない、平均皮膚温度と温冷感や快適感との関係を分析し、ミストファンによる平均皮膚温度低下効果と温熱的快適性について分析を深める必要がある。

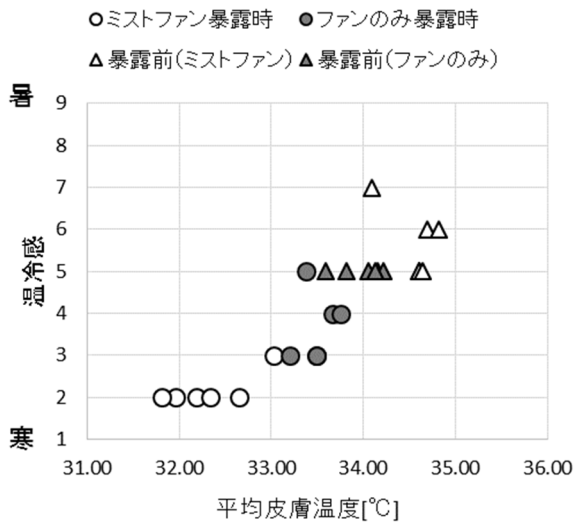


図4 温冷感申告（暴露前後の比較）

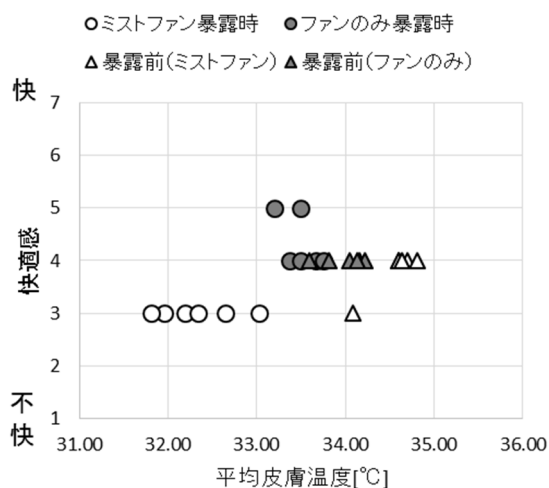


図5 快適感申告（暴露前後の比較）

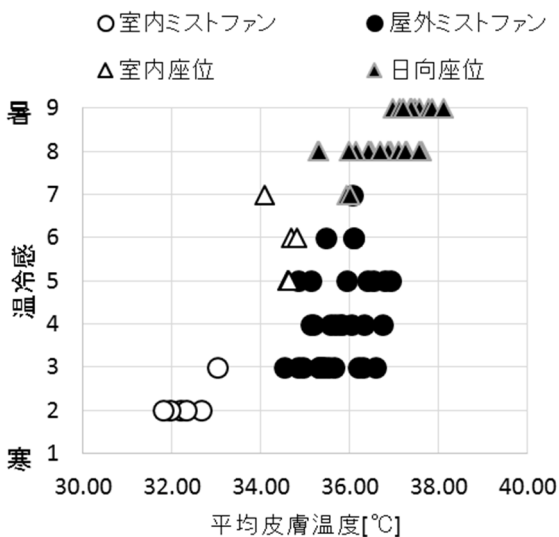


図6 温冷感申告（屋外実験との比較）

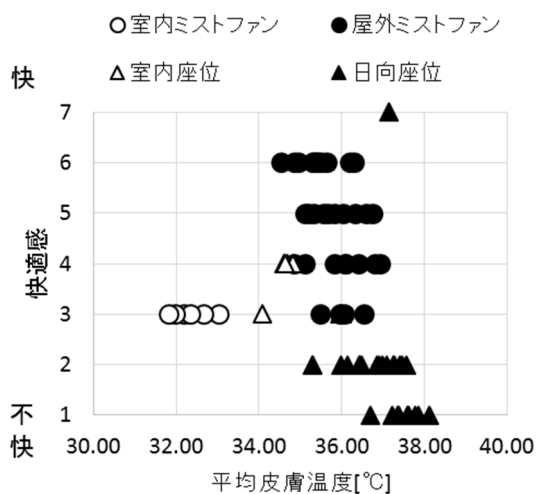


図7 快適感申告（屋外実験との比較）