

参考資料3 暑熱対策が人の生理・心理反応に及ぼす効果の実験

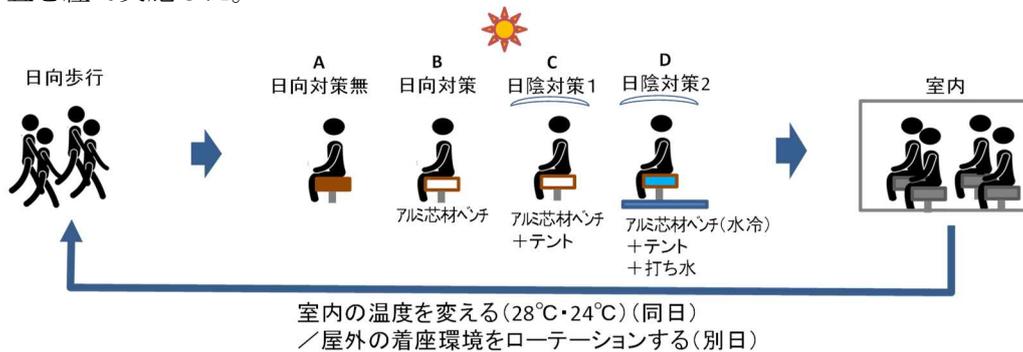
1. 目的

バス停などの待合所の暑熱環境の改善効果を評価するため、屋外において異なる熱環境で滞在した場合の生理反応、心理反応を計測した。さらに、屋外における熱環境の違いが生理反応、心理反応に及ぼす影響、また、その後、室温の異なる室内に入ったときの生理反応、心理反応に及ぼす影響を調べた。さらに参考として、水冷ベンチの温度の違いが心理反応に及ぼす違いについても実験を行った。

2. 実験実施概要

- ・実施期間 2015年8月3日～8月6日
- ・実施場所 日本工業大学 ゲストハウス及びその周辺
- ・被験者 20歳前後の健常な男性8名

被験者8名をA（日向対策無）、B（日向対策有）、C（日陰対策1）、D（日陰対策2）の4条件¹に各2人ずつを振り分け、はじめに屋内で準備、安静にしたのち、全員日向で5分間歩行する。その後、熱環境の異なる4パターンのベンチに15分間着座する。その後、室内に移動し座位にて20分間安静にする。この流れを一日に2回、繰り返し、屋外熱環境ばく露後の室内設定温度を1回目は28℃、2回目は24℃に設定した。なお、本実験は、日本工業大学人を対象とする研究倫理委員会の審査を経て実施した。



	11:00	11:30	11:50	12:10	13:00	13:20	13:40	
	1回目				2回目			
	30分	5分	15分	20分	50分	5分	15分	20分
A	屋内にて準備、安静	日向歩行	屋外座位 (日向対策無)	室内座位 28℃	屋内にて休憩、安静	日向歩行	屋外座位 (日向対策無)	室内座位 24℃
B			屋外座位 (日向対策)				屋外座位 (日向対策)	
C			屋外座位 (日陰対策1)				屋外座位 (日陰対策1)	
D			屋外座位 (日陰対策2)				屋外座位 (日陰対策2)	

同じ被験者がA・B・C・Dの4つの屋外ベンチ条件にばく露するように4日間実施

図1 実験概要とスケジュール

¹ B（日向対策有）はアルミ中空ベンチを使用、C（日陰対策1）は一般的な白色テントで日陰を作り、D群（日陰対策2）は複合的な暑熱対策としてテントに加えて、路面への打ち水、ベンチの座面を強制的に冷却した。

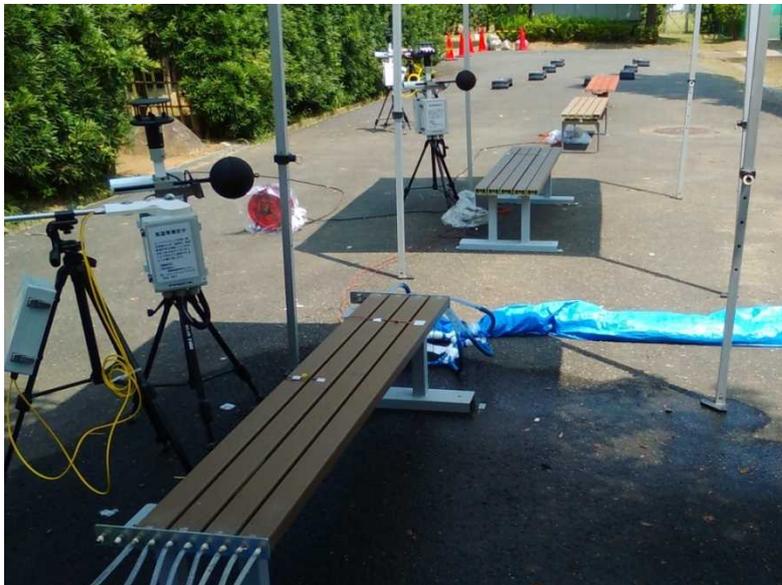


図 2 踏み台昇降の実施状況（上）と実験ベンチ（下）

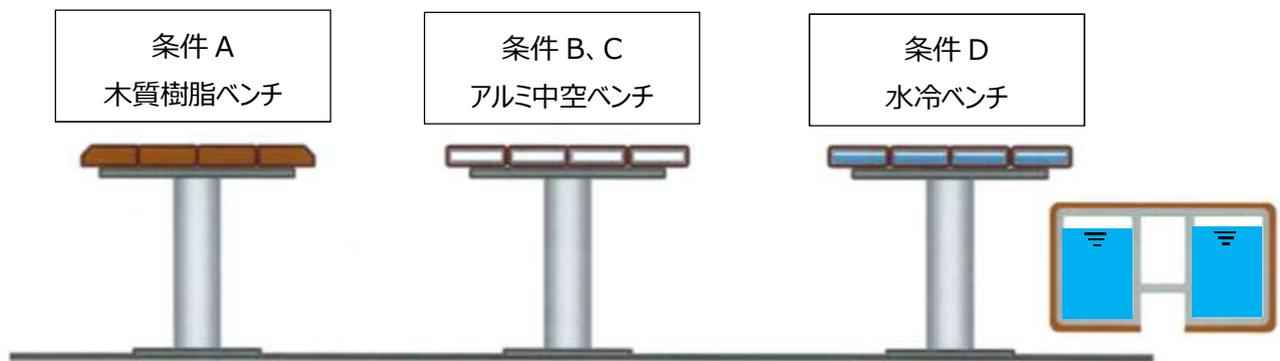


図 3 実験に用いたベンチの種類

3. 測定項目

①温熱環境

下記項目を屋外のテント有り・無し・テント有りがつ打ち水ありの3箇所及び室内で測定する。

表 1 温熱環境の測定項目

測定項目	測定機材	測定間隔	屋内外
乾球温度	乾球温度計	1 秒	内・外
相対湿度	湿度計	1 秒	内・外
風速	超音波風速計	1 秒	内・外
黒球温度	黒球温度計	1 秒	内・外
表面温度	放射温度計	1 秒	内・外
上下放射量(長短波)	長短波放射計	1 秒	外
熱画像	サーモカメラ	適宜	内・外

②生理反応

心拍数 心拍計 (POLAR, A300) を用いて 1 秒毎の心拍数を記録

血圧 血圧計を用いて歩行開始前と終了後、着座開始前と終了後、室内滞在開始前と終了後の血圧を計測

③主観申告

下記の項目について、実験期間中、5～10 分毎に申告させた。

- ・ 温冷感：9 段階
- ・ 快適感：7 段階
- ・ 乾燥感：7 段階
- ・ 気流感：6 段階
- ・ 発汗度：5 段階
- ・ 日射感：4 段階 (屋外のみ)
- ・ 運動強度：4 段階 (運動時のみ)
- ・ ベンチの温冷感：7 段階 (屋外ベンチ着座時のみ)
- ・ ねむけ：4 段階 (屋内のみ)
- ・ 許容度：4 段階
- ・ 満足度：4 段階

4. 測定結果

1) 熱環境の測定結果

8/3～8/6の4日間の実験期間中は概ね晴天が続き、気温は32～38℃程度と厳しい暑さの日が続き、実験条件A～Dで違いはほとんどない。風速は8/5にA～Cの条件で1m/sを超えたが、実験条件Dで若干低く、その他の日には0.6m/s前後で実験条件による違いは大きくない。

体感温度については、MRTが実験条件A・Bで70～75℃、Cで50℃、Dで45℃程度となっており、CとDの差は路面への打ち水やベンチの表面温度が低いことが影響していると考えられる。WBGTはA・Bで31℃以上、C・Dで31℃以下、SET*はA・Bで40℃以上、C・Dで35℃前後となっていた。

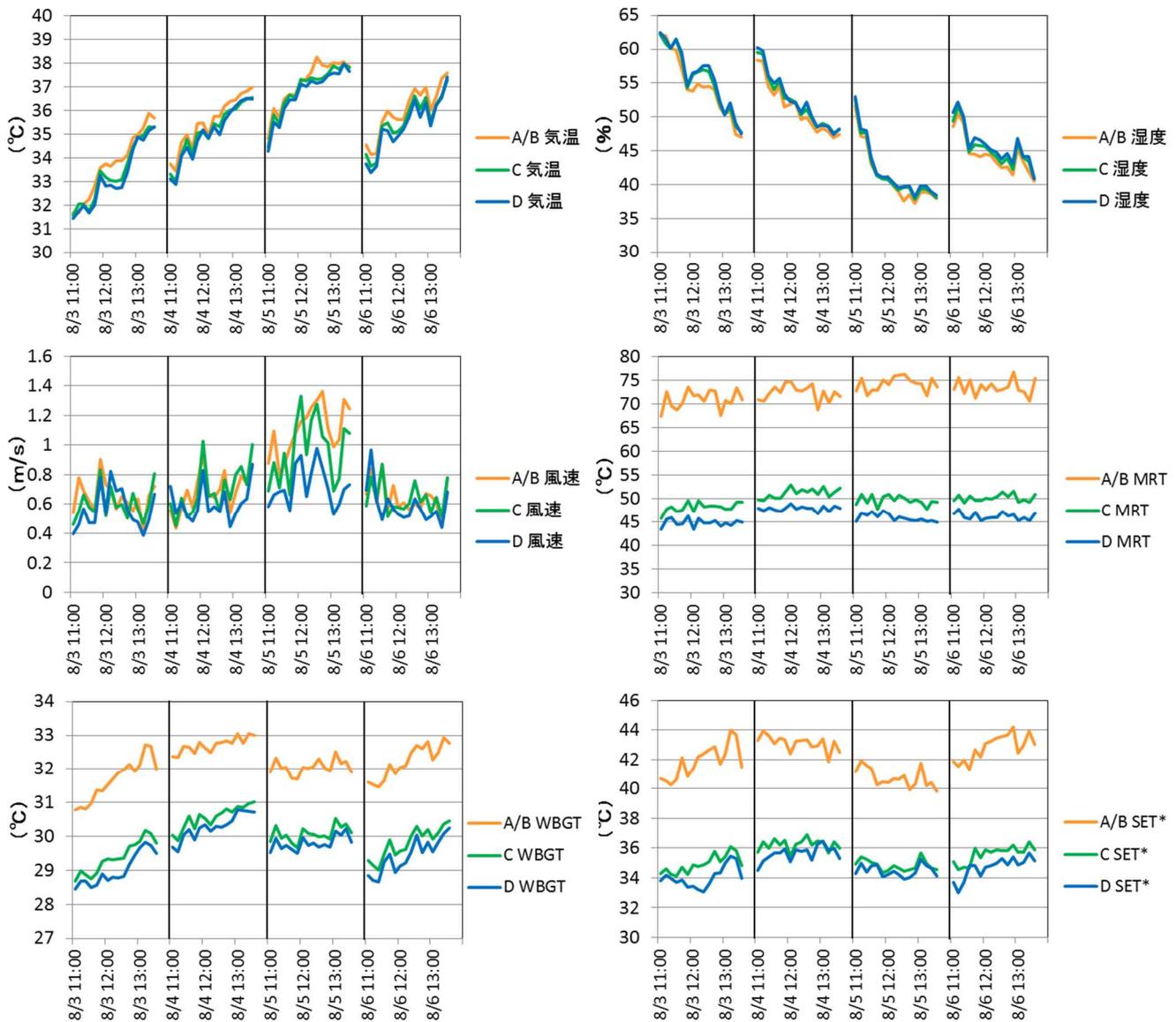


図 4 実験期間中の屋外熱環境

屋外のベンチの温度は、A・B のベンチ表面が高くなり過ぎるため、ベンチに着座するおよそ 15 分前までアルミシートを被せた。A では 8/4 を除き概ね 50℃以上、B では 40～50℃程度、C は 40℃ 前後、D の水冷ベンチは 8/4 に若干、高くなっているが、概ね 30℃前後であった。なお、用いた水は上水で、水温は 27℃程度であった。

座部の温度を見ると、A と B では着座することで温度が急激に低下しており、被験者に熱が伝導していたと考えられる。

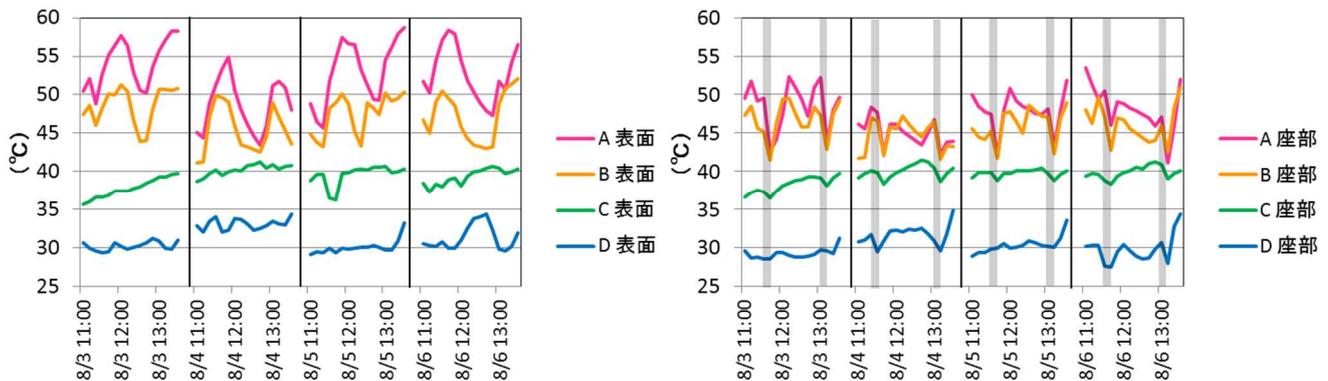


図 5 実験期間中の屋外ベンチ温度（左：ベンチ表面、右、ベンチ座部面(着座期間中に網掛け)）

室内の熱環境は空調機器によりコントロールしており、概ね 28℃前後、2 回目の屋外ベンチ着座後の室内気温は 24～25℃であった。SET*は 28℃、2 回目の屋外ベンチ着座後は 24℃程度であった。

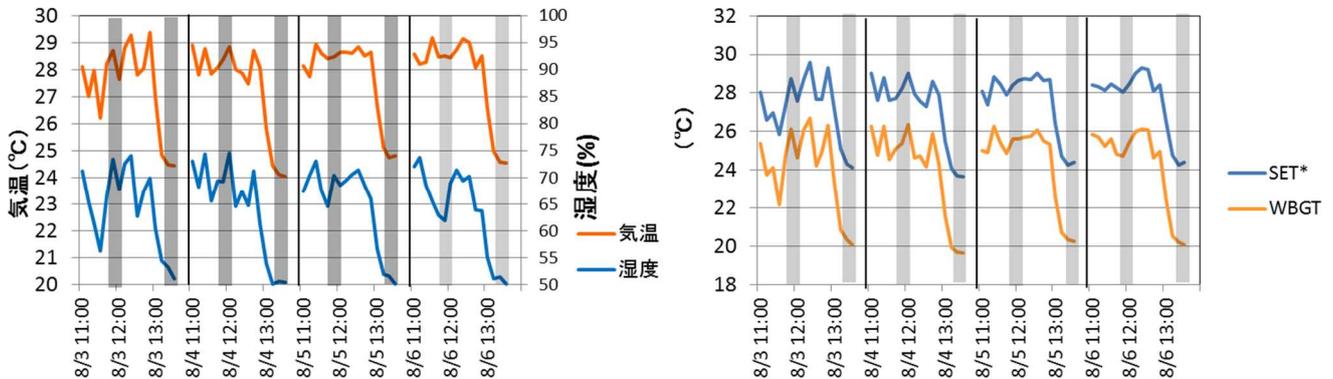


図 6 実験期間中の室内熱環境（屋外ベンチ着座後の室内滞在期間中に網掛け）

2) 生理指標の測定結果

実験中の 01～08 までの被験者の心拍数の推移を示す。運動開始前の 0:15～0:25 の 10 分間の平均値を基準とした差として示している。踏み台昇降運動（高さ 15cm の踏み台を 20 回/分で昇降）実施中は 10～30bpm ほど増加し、その後の屋外ベンチ着座中は条件 A で +10～20bpm 程度、条件 D ではほぼ ±0bpm であった。その後の室内座位では全体的に徐々に心拍数が低下する傾向が見られる。

被験者 03 の条件 B_28（28 は屋外ベンチ着座後の室内温度が 28℃条件）と B_24、被験者 07 の条件 B_28 でデータが適切に取得できなかった。

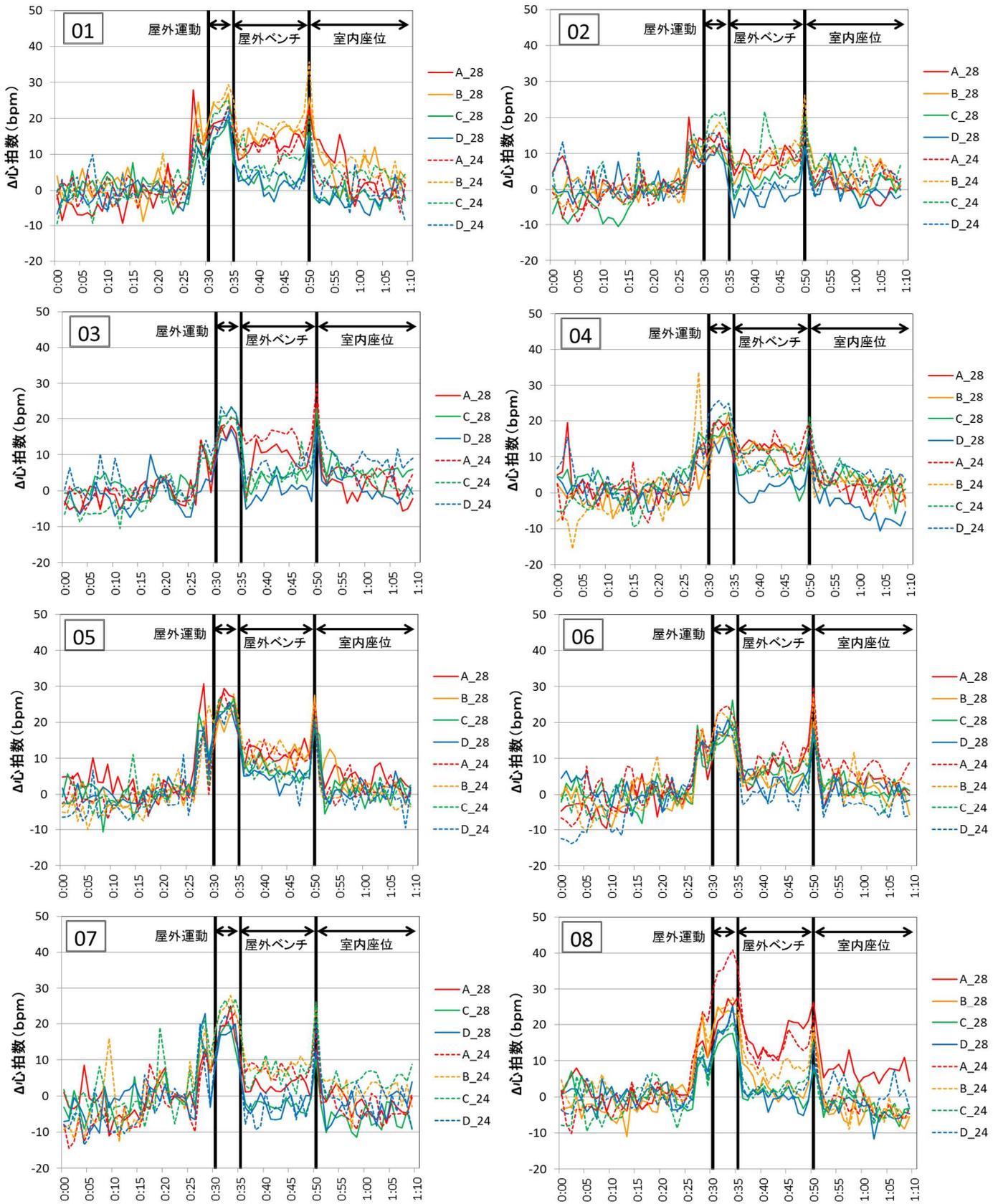


図 7 被験者 8 名の各実験パターンごとの心拍数の推移

※1: Δ心拍数は、実験開始後 0:15~0:25 までの 10 分間の平均値との差

※2: 凡例の A_28 とは、実験パターン A で屋外ベンチ着座後の室内温度 28℃条件の場合

3) 主観申告の結果

温冷感、快適感、許容度、満足度について、実験期間中の8人の平均値の推移を示す。屋外と屋内滞在中の申告が大きく異なり、特に屋外ベンチ着座中のベンチ条件による申告の差が大きい。屋外ベンチ着座中、AとBの差は明確でないものの、AとC、CとDについては差が見られ、特にDでは屋外の暑熱環境下にもかかわらず、空調室温28℃と同程度の申告となっていた。

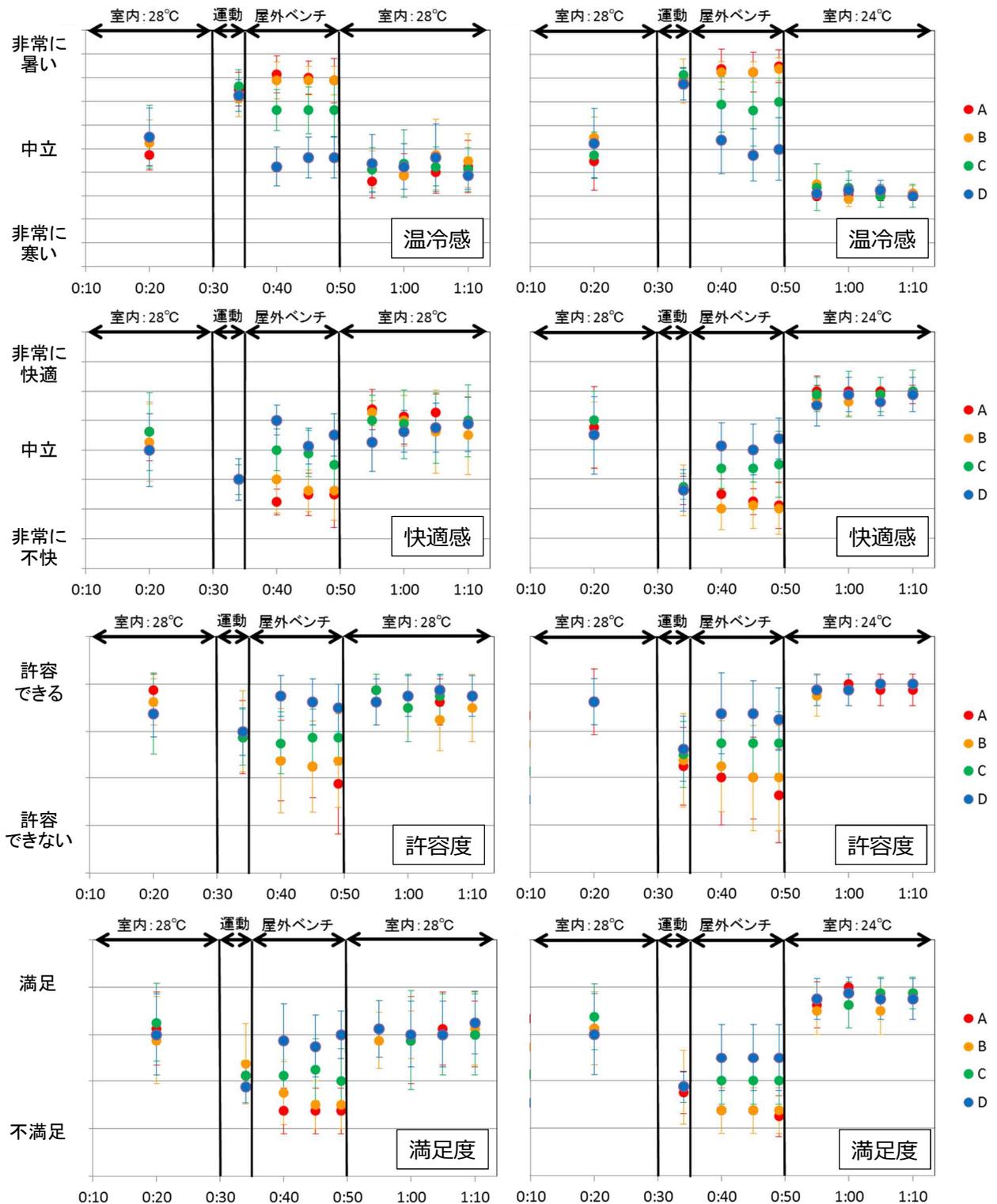


図 8 主観申告結果 (8人の平均値、左が屋外ベンチ滞在後の空調室温28℃、右が24℃)

4. 考察

1) 屋外ベンチ着座中の心拍数

屋外踏み台昇降運動後の屋外ベンチ着座中の心拍数（着座3分後からの10分間の平均値）について、安静にしていた踏み台昇降開始15分前から10分間の平均値を100とした場合の変化を示した。

被験者8人の平均的な心拍数変化は、条件Aが113、暑熱対策が進むに従い小さくなり、条件Dでは安静時とほぼ変わらない102となった。標準偏差は条件A、C、Dで4程度であったが、条件Bでは約6と大きくなっていった。

各条件の平均値の差を検定したところ、条件AとC、AとD、CとDで有意な差が見られ、暑熱対策による人の暑熱ストレスの低減効果が示された。

被験者	室温	心拍数 (安静時を100とした場合)			
		A	B	C	D
01	28°C	117.7	121.8	103.0	101.3
01	24°C	114.9	122.1	108.7	105.2
02	28°C	109.6	108.6	104.0	97.5
02	24°C	110.6	112.2	112.6	100.8
03	28°C	114.5	-	106.0	100.6
03	24°C	120.3	-	106.5	108.0
04	28°C	112.7	113.2	107.4	101.2
04	24°C	113.3	107.1	114.6	107.8
05	28°C	116.3	112.8	108.7	106.1
05	24°C	115.1	116.8	107.4	107.2
06	28°C	111.3	105.1	108.4	103.5
06	24°C	114.7	108.8	110.3	100.0
07	28°C	103.7	-	97.2	95.7
07	24°C	107.6	108.8	108.1	96.4
08	28°C	117.7	102.1	101.1	99.4
08	24°C	113.4	107.9	102.4	101.5
平均		113.3	111.3	106.7	102.0
標準偏差		4.0	5.8	4.2	3.8

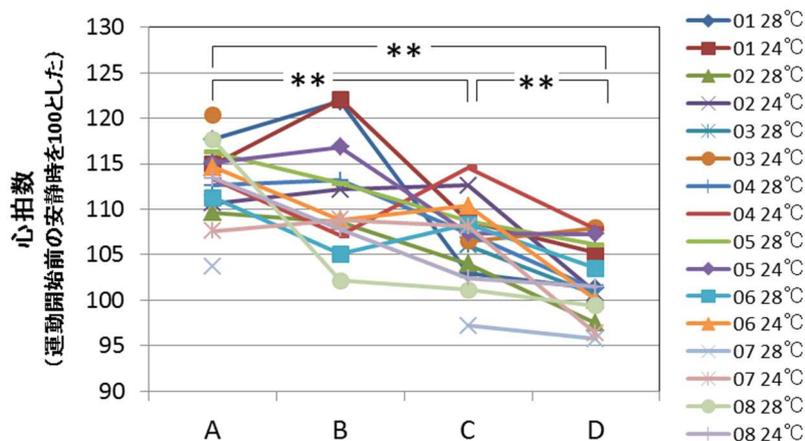


図 9 屋外ベンチ着座中の心拍数 (** : P<0.01)

2) 空調室内滞在中の心拍数

屋外ベンチ着座後の空調室内における心拍数について、屋外ベンチ滞在後の室温条件別にベンチ条件 A~D による違いを検討した。ここでの心拍数は、空調室入室 1 分後から 15 分間の平均値とした。各条件の平均値の差の違いを統計学的に検定すると、空調室温 28℃条件の A と D で有意な差が見られた。ただし、A と D の差は約 5、心拍数にして 3bpm 程度である。

空調室温 24℃ではベンチ条件による違いは見られず、個人間のバラつきが大きく、急激な温熱環境の変化による皮膚血管の収縮による影響などが考えられる。

表 2 空調条件 28℃の場合の心拍数

被験者	心拍数 (安静時を 100 とした場合)			
	A	B	C	D
01	107.1	108.3	97.5	95.9
02	100.1	105.3	103.3	100.4
03	101.8	—	108.3	102.1
04	102.2	104.0	104.2	95.7
05	107.3	105.1	101.4	101.1
06	103.9	101.9	103.3	104.4
07	97.3	—	93.0	94.9
08	108.8	96.9	98.6	96.8
平均	103.6	103.6	101.2	98.9
標準偏差	3.7	3.6	4.4	3.3

表 3 空調条件 24℃の場合の心拍数

被験者	心拍数 (安静時を 100 とした場合)			
	A	B	C	D
01	101.8	110.0	105.9	99.8
02	104.8	107.1	109.3	102.5
03	107.0	—	105.1	112.0
04	102.3	101.5	105.8	106.5
05	102.7	100.5	102.2	99.6
06	111.6	105.9	101.8	96.8
07	95.5	102.1	105.0	99.4
08	97.9	98.7	97.1	100.9
平均	102.9	103.7	104.0	102.2
標準偏差	4.7	3.8	3.4	4.6

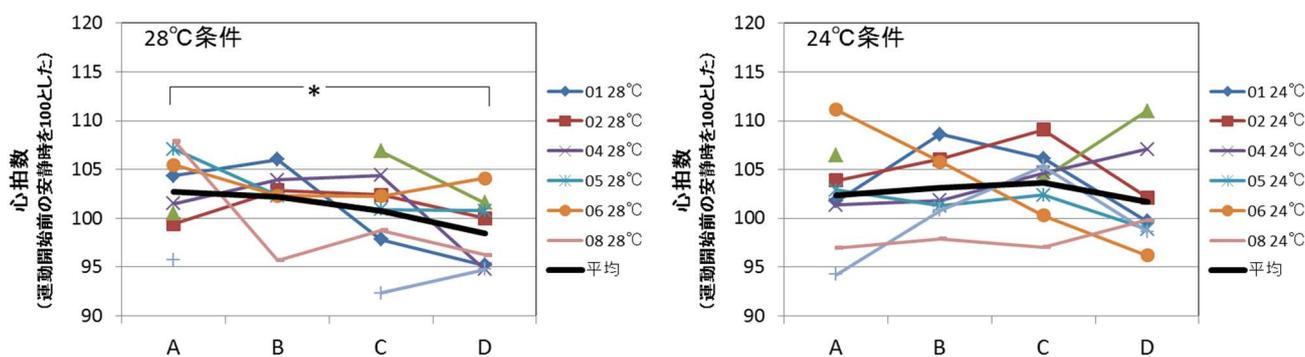


図 10 室内温度条件別の空調室内滞在中の心拍数 (* : P<0.5)

室温条件 28℃でベンチ条件によって心拍数に違いが見られたことについて、次頁では入室前の屋外滞在時の影響を調べるため、入室してからの経過時間による変化を確認した。

空調室入室後 1 分～5 分、6 分～10 分、11 分～15 分までの平均心拍数を求めた。統計学的には、室温条件 28℃の入室後 1～5 分、11～15 分で A と D で有意な差が見られ、入室直後のみでなく、10 分以上経過した場合でもベンチ環境の違いによる影響が確認された。

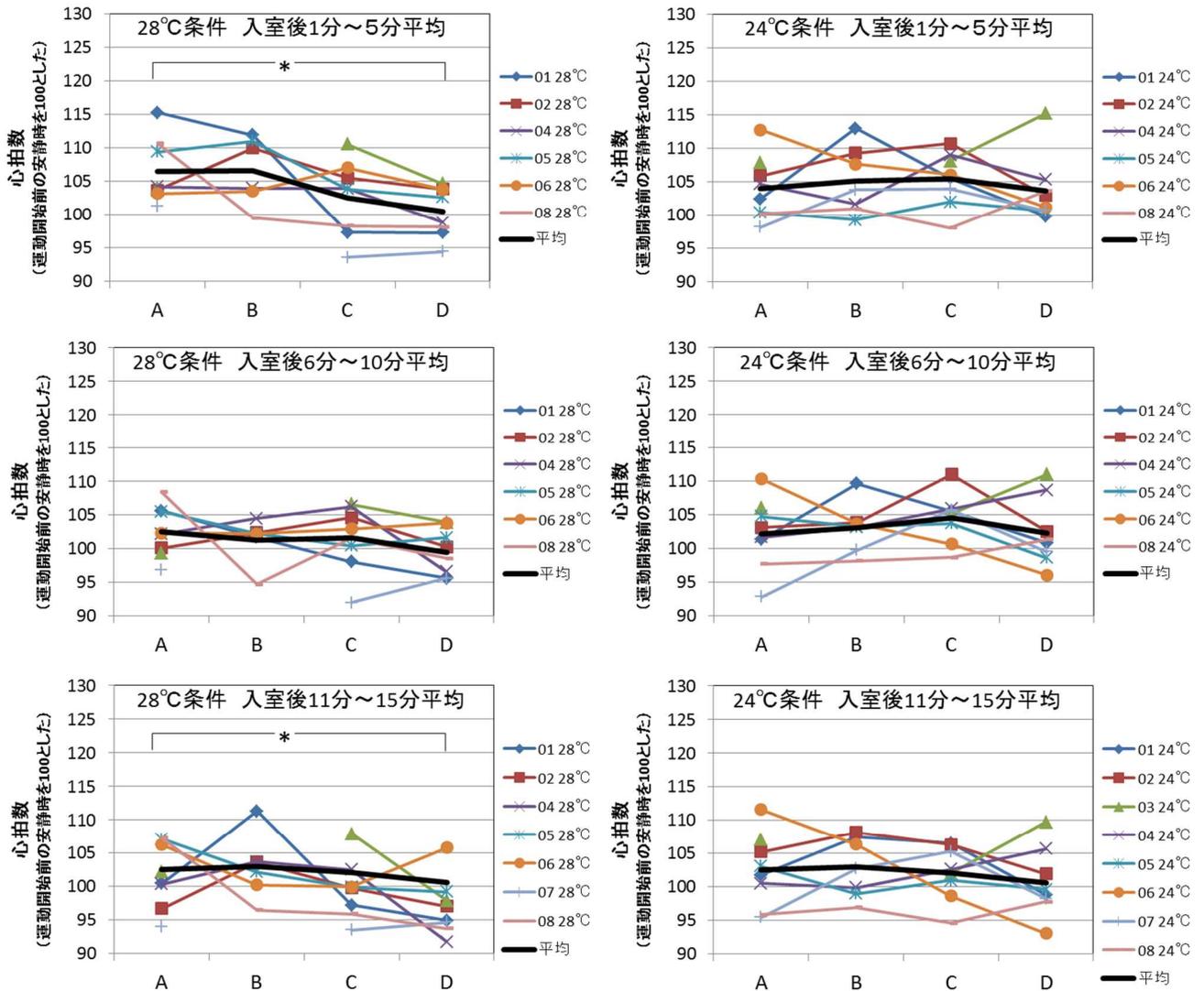


図 11 室内温度条件別・経過時間別の空調室内滞在中の心拍数 (* : P<0.5)

3) 屋外ベンチ着座中の主観申告

屋外ベンチ着座中の主観申告について、その申告レベルごとの頻度を見た。

温冷感については、条件 A で「非常に暑い」が最も多く、B では 1 段階、C では 2 段階、中立側に移動した申告が多くなっていった。条件 D では唯一、中立より 1 段階、涼しい側の申告となっていた。快適感でも同様に、唯一条件 D で中立より 1 段階、快適側の申告が多くなっていった。許容度を見ると、条件 A、B では「許容できない」側の申告が多いが、C、D では「許容できる」側の申告が多くなっていった。

A→B→C→D の順番に主観が改善されていることが分かるが、実験期間中の厳しい暑熱環境下で許容できる条件としては日陰にした条件 C が、より快適な環境を作るためには条件 D 程度の対策が求められることが分かる。

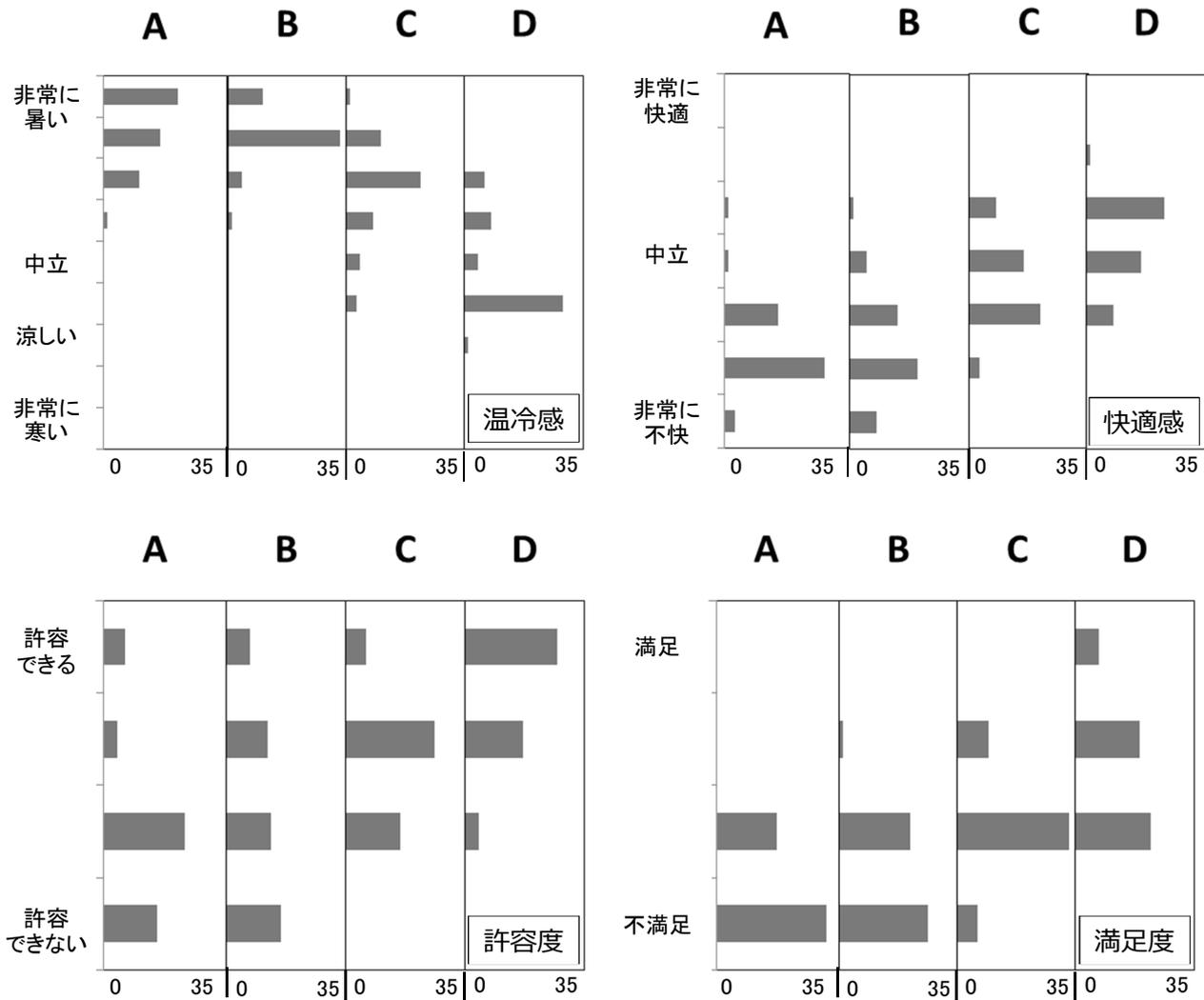


図 12 屋外ベンチ着座中の主観申告

3) 空調室内滞在中の主観申告

空調室内滞在中の主観申告について、室温条件別にその申告レベルごとの頻度を見た。

室温条件の違いでは、28℃条件にくらべて24℃条件で、申告レベルが1段階、「涼しい」「快適」「満足」の側にシフトしていた。許容度については、24℃、28℃条件ともに「許容できる」の申告が最も多かった。

ベンチ条件の違いによる影響は、許容度、満足度では確認できない。一方で温冷感は室温28℃条件の場合で、ベンチ条件Dが他のベンチ条件にくらべて中立の頻度が多くなっていた。快適感では、室温28℃条件の場合で、ベンチ条件C、DがA、Bにくらべて中立側の申告が多くなっていた。

これは、ベンチ条件A、Bでは暑熱環境から空調室内に移動した際の熱環境の改善度合いが大きいことから申告レベルの改善に寄与し、一方でベンチ条件Dはそもそも良好な熱環境であり、温度条件28℃の空調室内に移動した際の熱環境の改善度合い小さく、そのことが影響していると推察された。

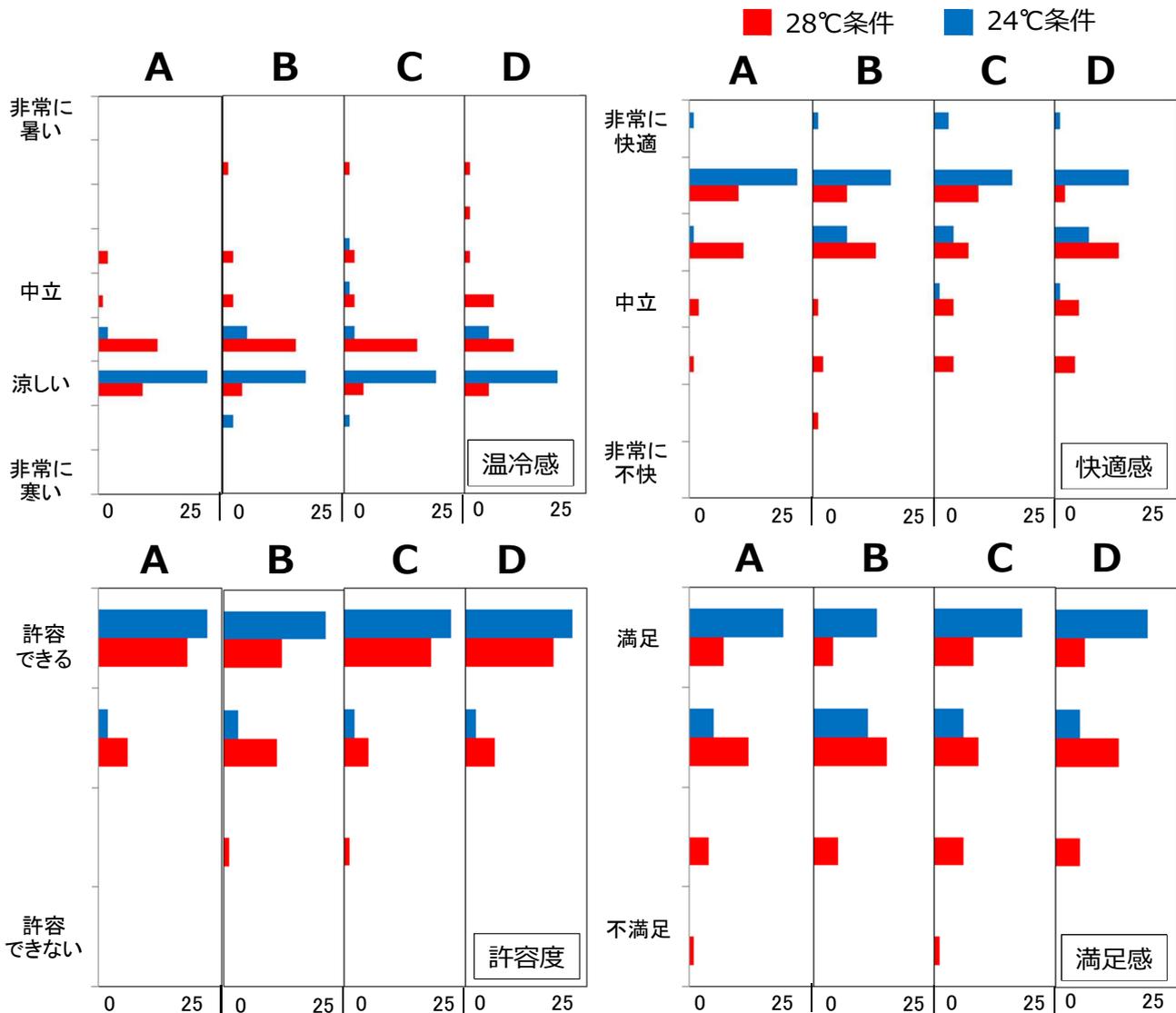


図 13 室内温度条件別の空調室内滞在中の主観申告

【参考 1】水冷ベンチの座面温度が心理反応に及ぼす影響の実験

1. 実験実施概要

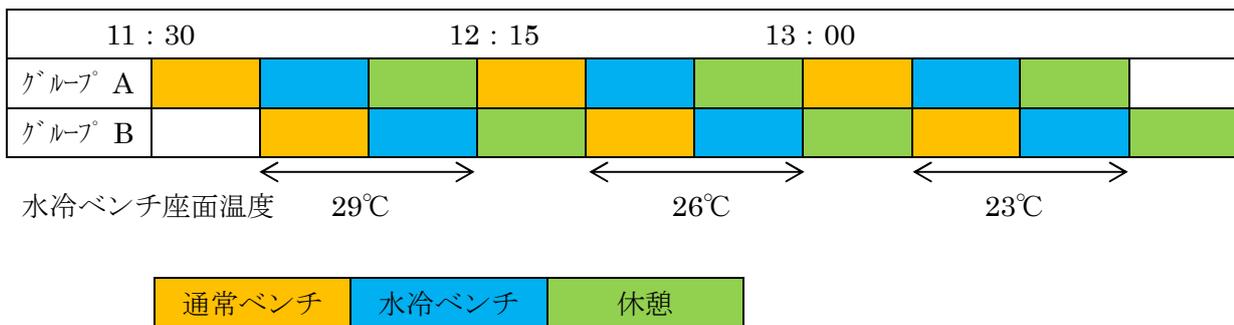
- ・実施期間 2015年8月11日～8月12日
- ・実施場所 日本工業大学 ゲストハウス及びその周辺
- ・被験者 20歳前後の健常な男性6名、女性2名

日陰の標準ベンチに15分間、続いて水冷ベンチに15分間着座し、温冷感等の主観申告を記録した。水冷ベンチの座面の温度が29℃（水道水）、26℃、23℃程度の3段階になるように入水温度を調整し、標準ベンチと水冷ベンチの着座を3回繰り返した。被験者数は1日あたり2人ずつの2グループで4人、2日間で合計8人で実施した。

測定項目：座面温度（熱電対）、臀部温度（サーミスタ：衣服の外側）

主観申告：着座5分後、10分後、15分後の3回

温冷感、快適感、満足感、許容度、ベンチ温冷感 等



2. 実験結果

1) 温熱環境の測定結果

実験期間中の温熱環境は、気温が32～35℃、SET*は33～36℃程度となっていた。

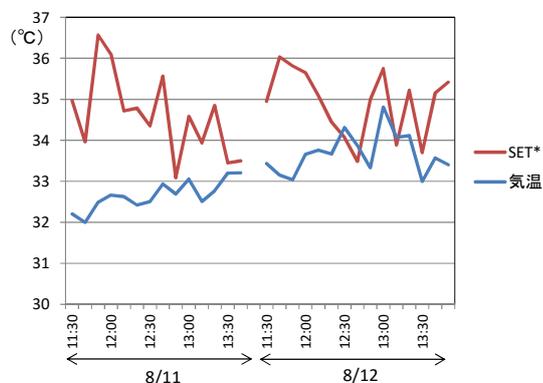


図 14 実験期間中の温熱環境（気温及び SET*）

2) 座面温度と臀部温度

被験者の臀部が接触しない座面の温度と被験者の臀部の温度の推移を被験者「01」を例に示す。標準ベンチの座面は 37～38℃程度であり、標準ベンチに座ることで 35℃程度の臀部温度が 2℃程度、上昇する。その後、水冷ベンチに着座することで直後に急激に臀部温度が低下し、その後、徐々に座面温度に近づくものの、着座した 15 分間では座面温度までには低下していない。

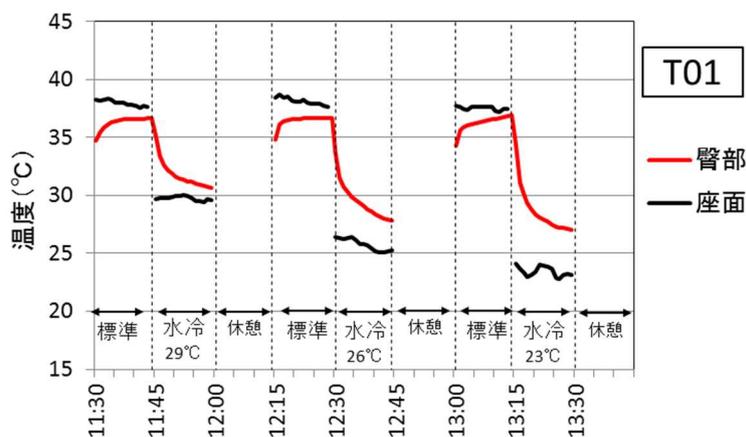


図 15 座面温度と臀部温度の推移

主観申告を取得した着座後 5 分、10 分、15 分後の被験者全員の座面温度と臀部温度との関係を見ると、今回の実験の範囲では、直線的な関係が見られた。ただし、35℃を基準として、座面の温度低下量に対して臀部温度の低下量は 6 割程度となっていた (傾き 0.62)。

なお、男性と女性で明確な差は見られなかった。

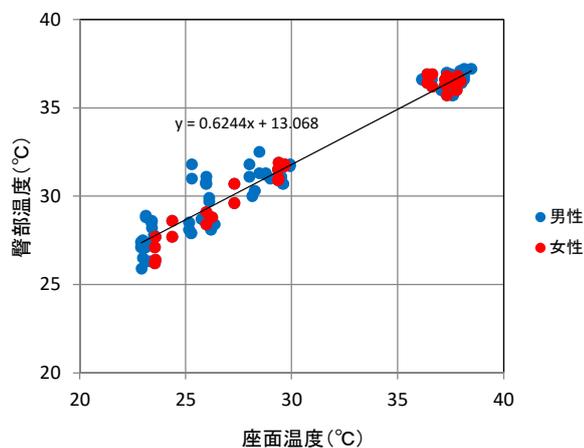


図 16 座面温度と臀部温度

3) 座面温度と主観申告

被験者「01」の座面と臀部温度の推移に温冷感とベンチ温冷感を重ねて示した。標準ベンチに着座中の温冷感は「暖かい」もしくは「やや暖かい」、ベンチ温冷感は同様に「温かい」もしくは「やや温かい」が中心となっていた。その後、水冷ベンチに移ると、温冷感は「中立」から「やや涼しい」との申告になり、水冷ベンチの温度によって大きくは変わらない。一方、ベンチ温冷感はベンチの座面温度によって 29℃では「やや冷たい」、26℃では「冷たい」、23℃では「非常に冷たい」と変化していた。

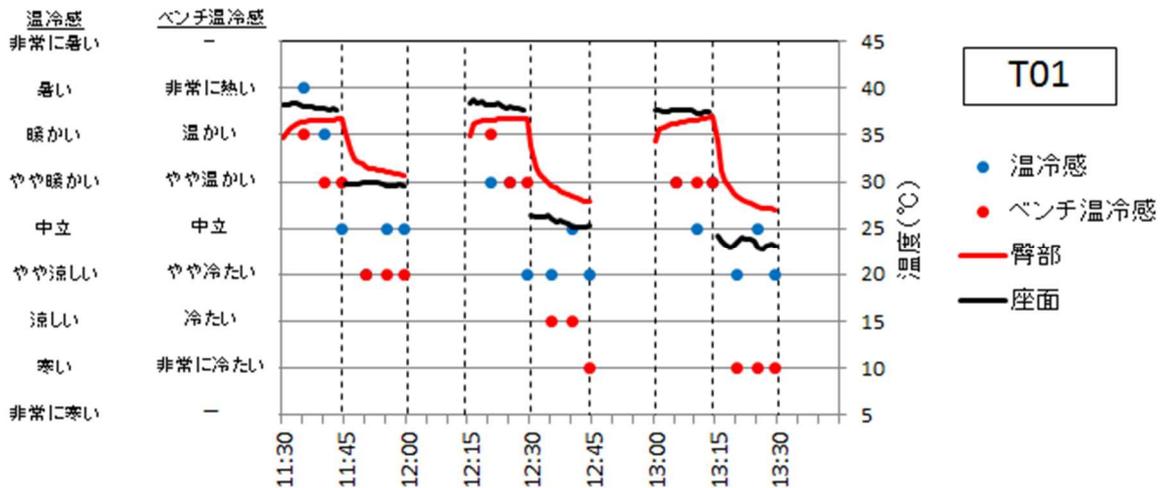


図 17 被験者「01」における主観申告の推移

被験者全員で座面温度と主観申告の関係を見ると、温冷感では座面温度 37℃前後の標準ベンチで「暑い」側の申告が目立っていたものが、座面温度 30℃以下の水冷ベンチに座ることで「中立」付近の申告が見られる。座面温度 26℃以下では「涼しい」の申告が見られ、特に女性の申告が多くなっていた。

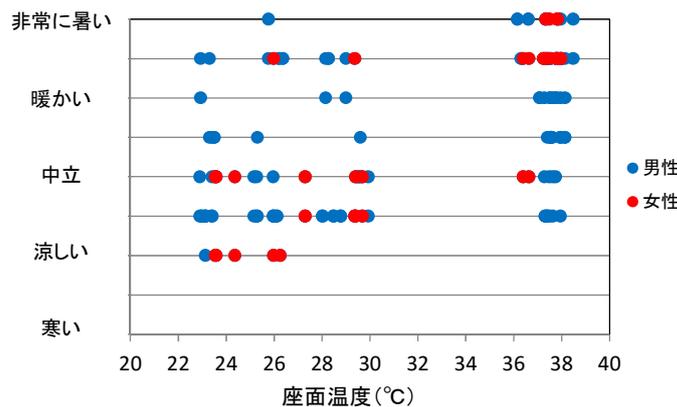


図 18 座面温度と温冷感

満足度と許容度については座面温度 37℃前後の標準ベンチにくらべ、水冷ベンチでは満足側、許容できる側の申告が増加する傾向が見られた。また、水冷ベンチの温度の違いによる満足度と許容度の変化は確認されなかった。

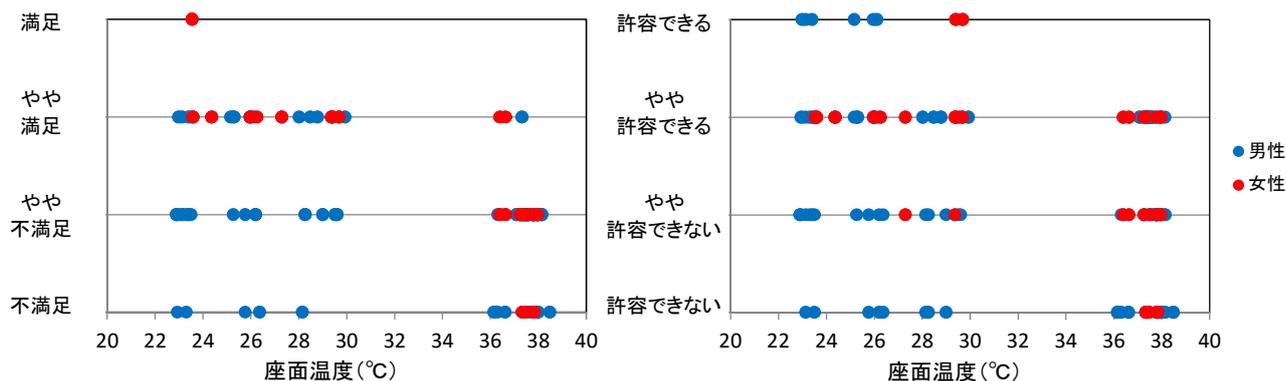


図 19 座面温度と満足度 (左)、許容度 (右)

一方で、ベンチ温冷感は、座面温度との明確な関係が見られた。座面温度 30～35℃の範囲のデータが取得できていないため明確ではないが、座面温度が 33～35℃付近より低下することで、臀部からベンチへの熱の移動が増え、「冷たい」側の申告が急速に増えたものと考えられた。

特に女性の方が、座面温度が低下するに従い、冷たい側に申告が移る傾向が顕著であり、座面温度約 26℃以下では「非常に冷たい」の申告が増加した。また、許容度の申告には現れなかったが、水冷ベンチに着座中、2人の女性のうち1人は強い不快感を申告したため、実験を中止して離席した。

そのため、水冷ベンチの座面温度については、冷たい刺激が強くない 29℃程度が適当と考えられた。

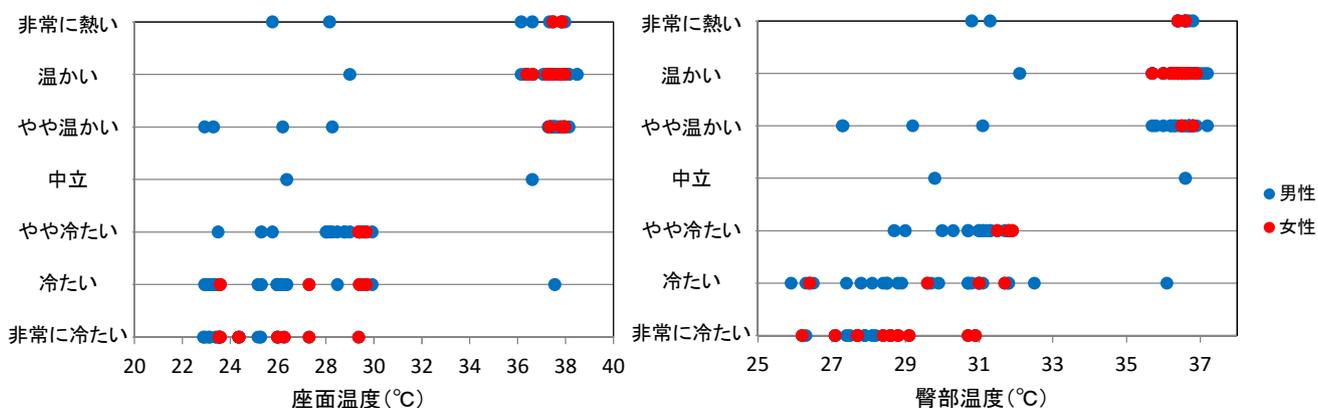


図 20 座面温度とベンチ温冷感 (左)、臀部温度とベンチ温冷感 (右)

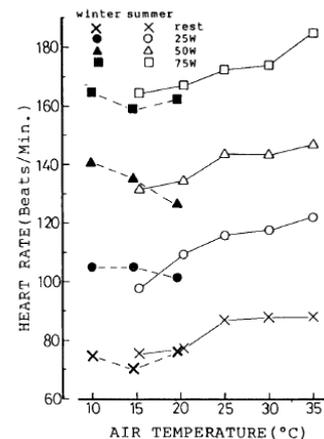
【参考2】生理・心理反応実験を行うにあたって参照した文献

本実験では、生理反応として心拍数を測定したが、下記のような文献を参照とした。

生理反応については、下記のとおり、温熱環境が厳しくなるほど心拍数が高まるという結果が得られているため、生理反応として心拍数の計測は妥当であると判断した。

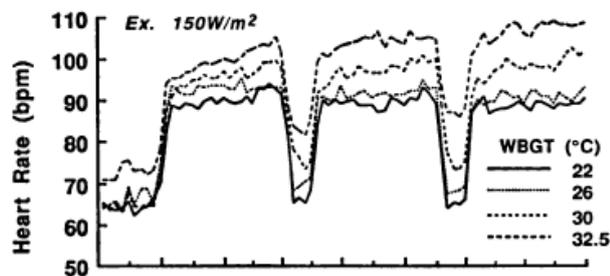
・気温と運動時の心拍数

人工気候室においてペダリング運動を15分間実施した実験では、気温が高いほど、運動強度が強いほど、心拍数が高くなった²。



・WBGT と運動時の心拍数

人工気候室においてペダリング運動を20分間実施した実験では、WBGTが高いほど心拍数が高くなった³。



また、「心理変化は即時性が高く、場合によって環境温度の変化以上に変化することもある。⁴」との言及を参考に、主観申告も同時に調査することとした。

² 早川 和代ら，気温と運動強度が運動時の人体に及ぼす影響に関する研究，日本建築学会計画系論文報告集 (394), 10-19, 1988

³ 寄本 明，WBGTを指標とした暑熱下運動時の生体応答と熱ストレスの評価，体力科学 41(4), 477-484, 1992

⁴ 彼末一之監修、朝倉書店、からだと温度の事典 5. 環境温度と皮膚温・温熱感より