

参考資料 6 人体生理・心理反応による暑熱対策施設の評価について（熊谷市役所バス停）

1. 目的

測器による温熱要素の測定に加え、人の生理反応、心理反応を計測、評価することで、暑熱対策施設の効果を多面的に把握する。特に、温熱4要素では捉えきれない暑熱対策技術、ここでは水冷ベンチの効果をもとに人の熱収支で評価する。

2. 実験概要

- ・実施期間 2016年8月3日～8月5日
- ・実施場所 熊谷市役所前バス停の暑熱対策施設及びその周辺
- ・被験者 20歳前後の健常な男性6名

空調室内で30分間滞在後、屋外に移動して日向で5分間歩行（踏み台昇降）した。次に、被験者6名を日向（sun）、仮設テント（tent）、暑熱対策施設（cool）の3条件に各2人ずつを振り分け、15分間着座した。この流れを1日に2回、繰り返した。

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。



図1 実験イメージ

表1 実験スケジュール

	11:20	11:50	12:10	12:30	13:30	14:00	14:20		
	30分	5分	15分	20分	60分	30分	5分	15分	20分
準備	室内着座	日向歩行	屋外着座 (日向) 屋外着座 (テント) 屋外着座 (暑熱対策)	室内着座	休憩	室内着座	日向歩行	屋外着座 (日向) 屋外着座 (テント) 屋外着座 (暑熱対策)	室内着座

体重計測



左：被験者実験での日向・日陰での滞在の様子
右：被験者実験での対策設備内での滞在の様子

図2 実験実施状況

3. 測定項目

1) 温熱環境

表2に示す項目について日向、仮設テント、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	超音波風速計	1秒
黒球温度	黒球温度計	1秒
熱画像	サーモカメラ	適宜

2) 水冷ベンチ座面の伝導熱量

人体から水冷ベンチに伝わる熱について、熱流板（5cm×5cm、厚さ0.7mm）を着座面の大腿部、臀部の左右に計4枚並べて1秒値を記録した。伝導熱量の測定は実験の一部で実施し、人体とベンチの熱コンダクタンスを求め、伝導熱量を推計した。

なお、日向及び仮設テントの椅子については、座面をスタイロフォーム（厚さ30mm）で覆い、人体との熱の伝導は無いものとして扱った。

3) 生理反応

心拍数は、心拍計を用いて1秒毎の心拍数を記録した。

皮膚温度は、7点の皮膚温度を10秒ごとに記録（ただし、暑熱対策施設条件のみ）した。

発汗量は、精密体重計で体重減少量を測定した。

4) 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
- ・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. 評価方法

1) グラフ等の凡例記号

6名の被験者は匿名化し、A1、A2、B1、B2、C1、C2とした。

屋外着座時の環境条件として、日向は「sun」、仮設テントは「tent」、暑熱対策施設は「cool」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、11:20からの1回目の実験を「1」、13:30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

	8/3		8/4		8/5	
	1回目	2回目	1回目	2回目	1回目	2回目
A1	A1_sun_1	A1_sun_2	A1_tent_1	A1_tent_2	A1_cool_1	A1_cool_2
A2	A2_sun_1	A2_sun_2	A2_tent_1	A2_tent_2	A2_cool_1	A2_cool_2
B1	B1_tent_1	B1_tent_2	B1_cool_1	B1_cool_2	B1_sun_1	B1_sun_2
B2	B2_tent_1	B2_tent_2	B2_cool_1	B2_cool_2	B2_sun_1	B2_sun_2
C1	C1_cool_1	C1_cool_2	C1_sun_1	C1_sun_2	C1_tent_1	C1_tent_2
C2	C2_cool_1	C2_cool_2	C2_sun_1	C2_sun_2	C2_tent_1	C2_tent_2

2) 熱環境の把握方法

MRTについては、ISO7726の方法により黒球温度等から算出した。

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、着衣量は半袖半ズボンとして0.3clo、着座時の代謝量は1metとした。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。

5) 人体熱収支の評価方法

ベンチに座った際の人への熱負荷を人の熱収支で評価することとし、代謝量 (M) の放熱手段として対流放熱 (C)、放射放熱 (R)、蒸発放熱 (E)、伝導放熱 (Cd) の4つを考慮する。

$$M=C+R+E+Cd+S$$

M は外部仕事量を差し引いたものとし、S は非定常状態での身体への熱負荷を評価するパラメータ (蓄熱量) である。放熱量はプラスを放熱側、マイナスを受熱側とした。

(1) 代謝量の設定

ベンチに座っている状態で 1 met とし、58.2W/m² とした。

(2) 放熱量の計算

① 対流放熱 (C)

平均皮膚温度 (t_{sk} : °C) と気温 (t_a : °C) との温度差に比例して放熱される。

$$C = h_c(t_{sk} - t_a) \frac{A_s - A_b}{A_s} \quad (\text{W/m}^2)$$

対流熱伝達率: h_c (W/(m²·K)) は風速との関係式として、持田の方法¹ ($1.16 \times (270 \times v^2 + 23)^{1/3}$) で求める。平均皮膚温度は堺市綾ノ町電停で行った実験の結果から、SET* との関係式を作成 ($t_{sk} = 0.2403 \times \text{SET}^* + 28.21$ 、相関係数: 0.97) して求めた。 A_b (m²) はベンチに座った場合に人体表面がベンチに接する面積 (以下、「臀部面積」という。)、 A_s (m²) は人体表面積である。

② 放射放熱 (R)

平均放射温度 (MRT) と人の表面温度との差から求める。

$$R = h_r(t_{sk} - \text{MRT}) \frac{A_s - A_b}{A_s} \quad (\text{W/m}^2)$$

放射熱伝達率 (h_r : W/(m²·K)) は 4 とした。

③ 蒸発放熱 (E)

発汗及び不感蒸泄による蒸発放熱量は、発汗量: S (体重減少量 g/(m²·hr)) から求める。

$$E = \frac{S \times h_L}{t} \times \frac{A_s - A_b}{A_s} \quad (\text{W/m}^2)$$

ここで、 h_L は水の潜熱 (皮膚温 35°C として 2416 J/g)、 t は体重の計測間隔 (s) である。ただし、実際の発汗量はばらつきが大きく、水冷ベンチの効果の推定精度を高めるため、実験で得られた SET* との関係式 ($S = 11.077 \times \text{SET}^* - 289.75$ 、相関係数: 0.72) から推計した。

④ 伝導放熱 (Cd)

水冷ベンチの座面の温度 (T_{ch} : °C) と臀部温度 (T_b : °C) の差に比例して放熱される。

$$Cd = h_{cd}(t_b - t_{ch}) \frac{A_b}{A_s} \quad (\text{W/m}^2)$$

ここで、 h_{cd} は水冷ベンチに座った場合の熱コンダクタンス (W/(m²·K)) である。

h_{cd} は、測定により求める。

¹ 持田徹, 人体についての平均対流熱伝達率, 人間工学, Vol. 18 No. 5, 1982

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、8/3が30°C前後、8/4が32°C程度、8/5が34°C前後となっていた。

日向と仮設テントの気温には差が見られず、暑熱対策施設は日向にくらべて平均で0.7°C、最大で1.3°C低くなっていた。逆に湿度は平均3%程度、高くなっていた。

風速は、日向と仮設テントでは大きな差が見られないが、暑熱対策施設では日向の1/2~1/3程度の値となっていた。

MRTは、日向の平均が66.2°C、仮設テントが47.9°C、暑熱対策施設は35.5°Cであった。

SET*は、日向の平均が38.7°C、仮設テントが33.7°C、暑熱対策施設は31.2°Cであった。

なお、水冷ベンチの座面温度は、26~27°C程度を保持した。

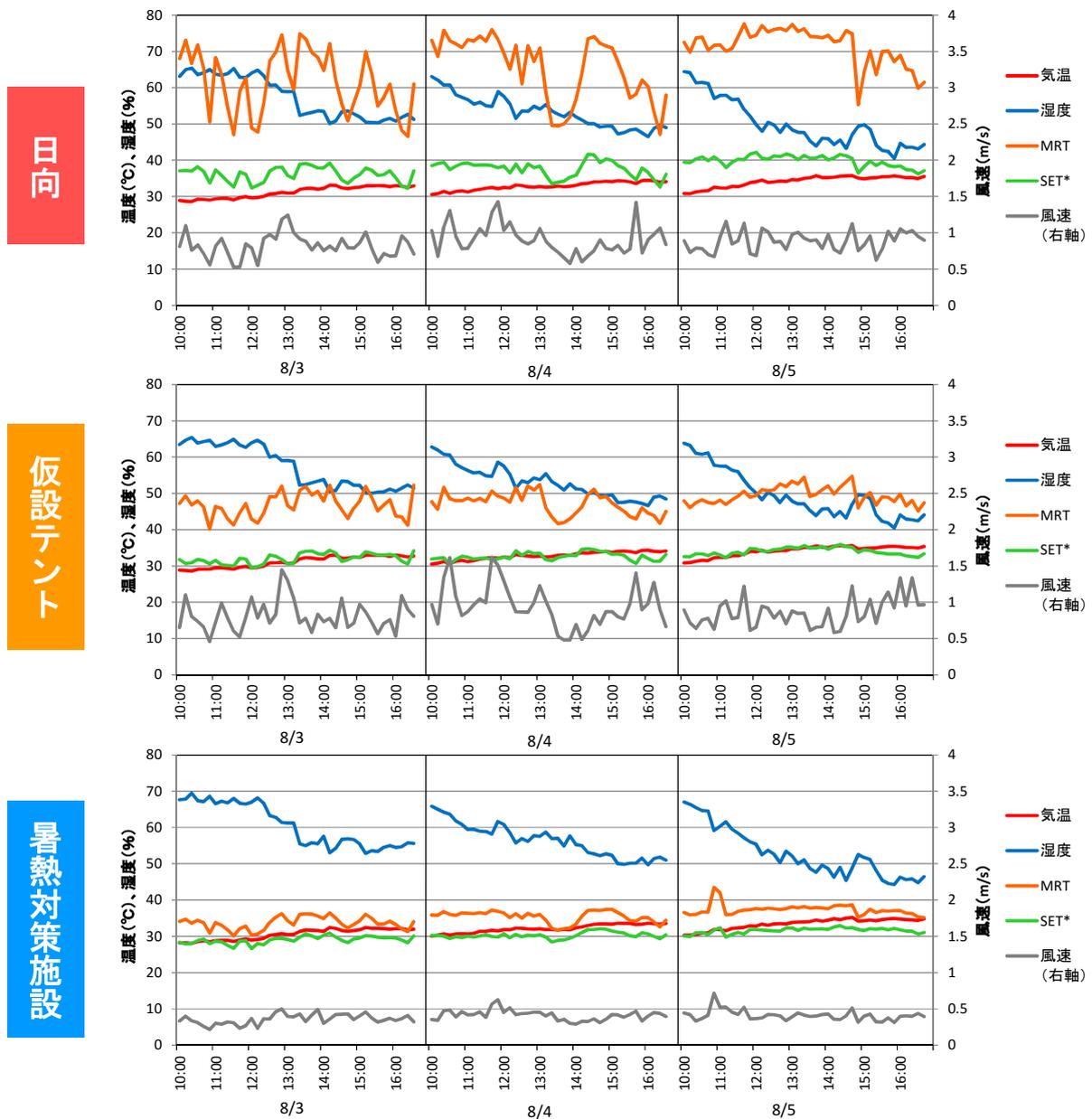


図3 実験期間の熱環境の比較 (条件ごと)

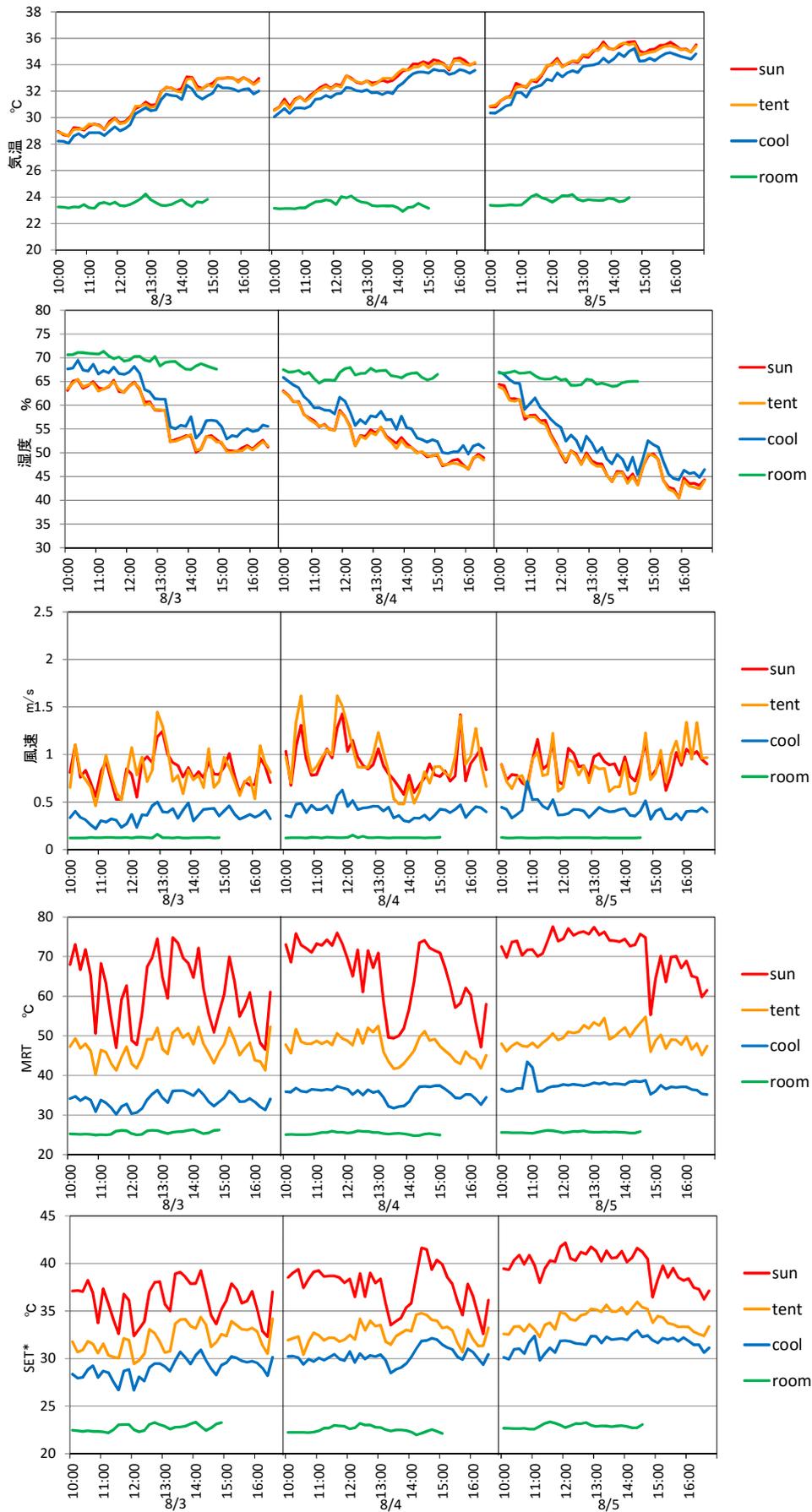


図4 実験期間の熱環境の比較 (熱環境要素ごと)

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、屋外着座時には速やかに低下して安定していた。屋外着座時の傾向としては、日向が高く、暑熱対策施設が低くなっていた。

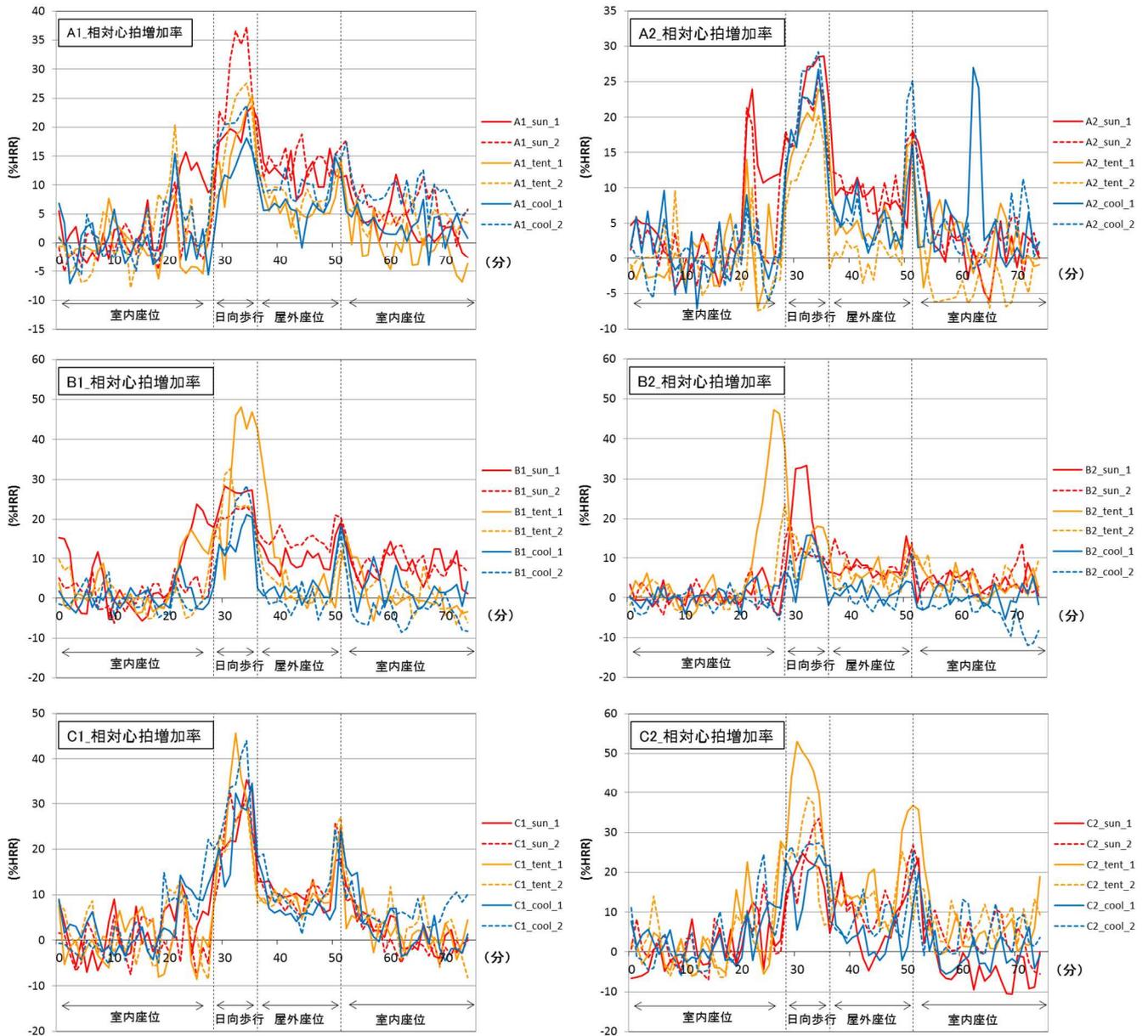


図5 各被験者の心拍数の推移

暑熱環境下では、心拍数が有意に増加することが指摘されている²。屋外着座時の相対心拍増加率を SET*との関係で見ると、ばらつきが大きいものの、SET*が高くなるほど相対心拍増加率が大きくなる傾向が見られた。

日向と暑熱対策施設では統計学的に有意な差 ($p < 0.01$) が見られた。

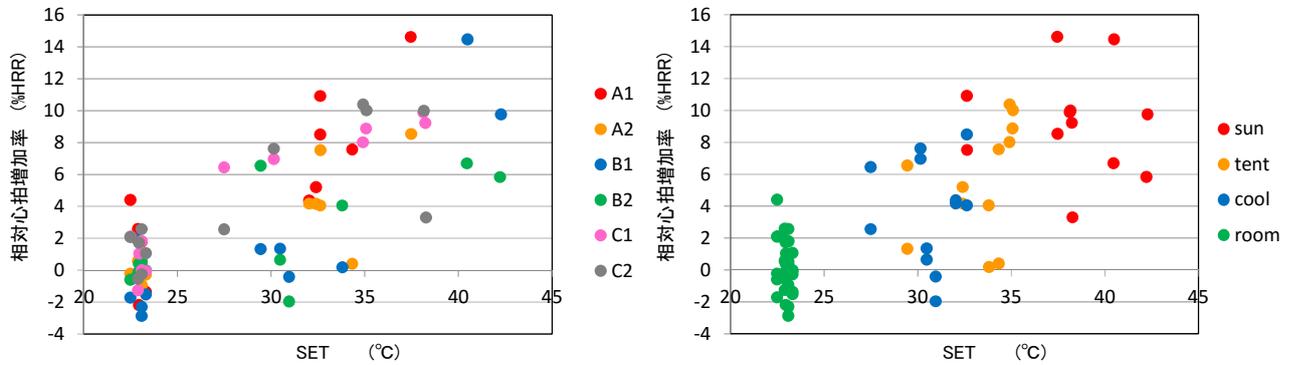


図6 被験者ごと（左）と条件ごと（右）の SET*と相対心拍増加率の関係

(2) 発汗量

日向歩行及び屋外着座時の発汗量は、 $50 \sim 200 \text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{hr})$ 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。

日向と暑熱対策施設では統計学的に有意な差 ($p < 0.01$) が見られた。

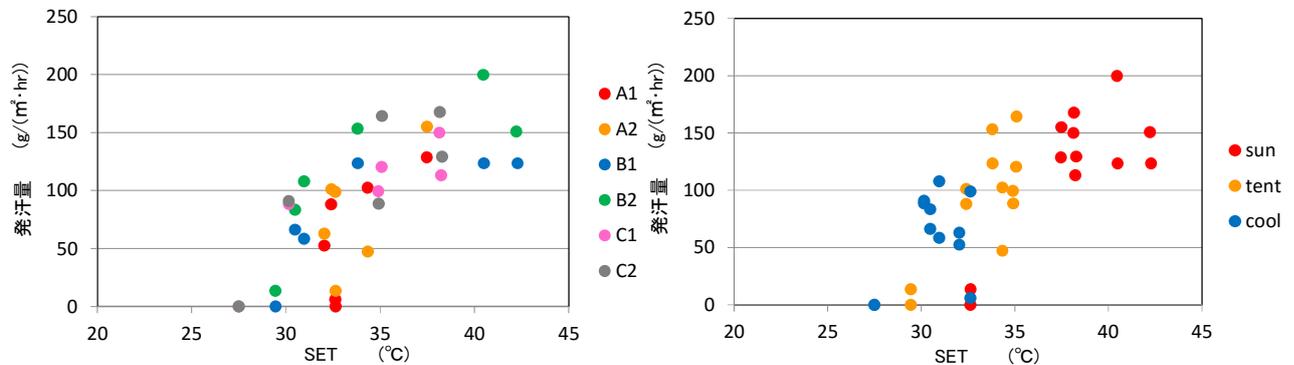


図7 被験者ごと（左）と条件ごと（右）の SET*と発汗量の関係

² 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、Vol. 41 (1992)

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*との関係性が見られ、暑熱対策施設では申告が明確に改善されていた。

特に、暑熱対策施設では、SET*30℃以上でも温冷感では、「涼しい」側（図8 1段目 赤色破線囲った）、快適感でも「快適」側（図8 2段目 赤色破線で囲った）の申告が多く見られ、SET*として捉えた熱環境以上に被験者の申告を改善させている可能性が考えられた。これには、SET*の計算に考慮していない水冷ベンチによる直接的な放熱が影響しているものと推察された。

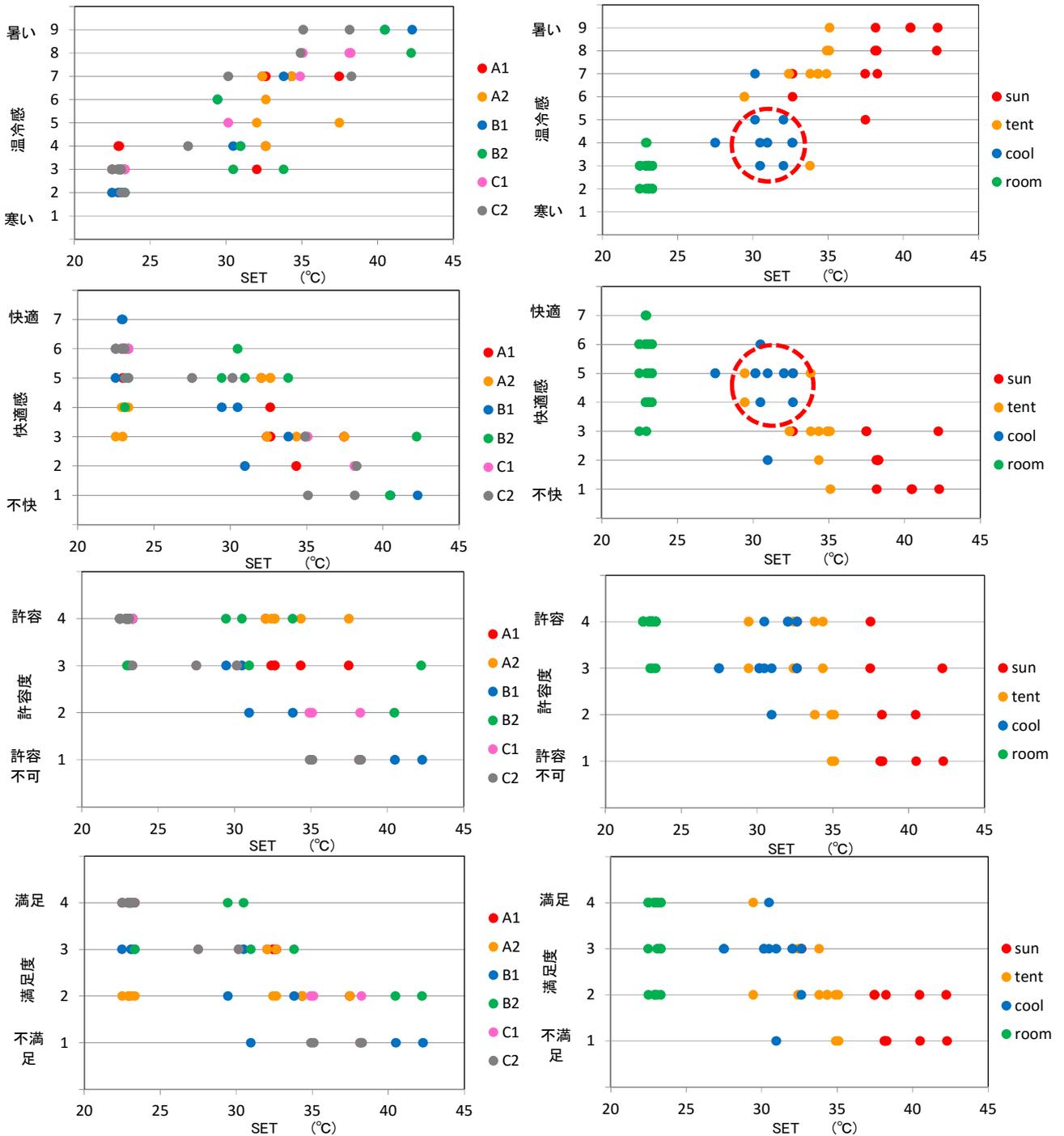


図8 被験者ごと（左）と条件ごと（右）の SET*と主観申告の関係

6. 人体熱収支による水冷ベンチの評価

人体の熱収支の評価は、6人の被験者の計36サンプルを対象にした。

1) 水冷ベンチの熱コンダクタンス

水冷ベンチへの伝導放熱量を計算する際の熱コンダクタンス $h_{cd} [W/(m^2 \cdot ^\circ C)]$ を、測定により求めた。

熱コンダクタンスは、以下の式で求めた。

$$h_{cd} = q / (T_b - T_{CH})$$

ここで、 q は熱流量 (W/m^2)、 T_b は臀部温度 ($^\circ C$)、 T_{CH} は座面温度 ($^\circ C$) である。

①～⑤までの着衣の異なる5人の被験者で、15分間の熱流計測を実施した。測定結果を図9に示す。

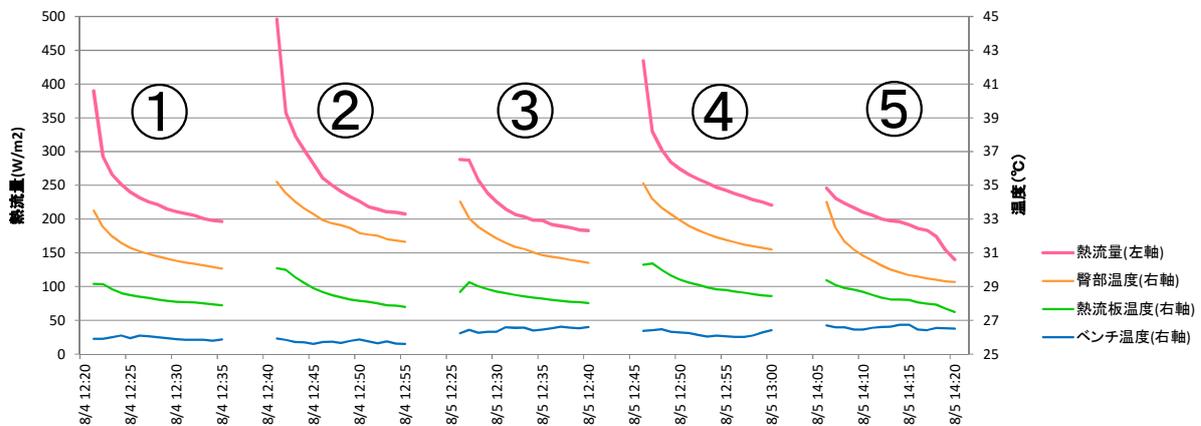


図9 水冷ベンチによる熱流量

熱コンダクタンスは、着衣の違いによって異なり、5人の平均で $44.2 W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ であった。このうち、生理・心理反応の実験時の着衣は⑤の $50.1 W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ であった。

表4 熱コンダクタンスの測定結果

	①	②	③	④	⑤	平均
$h_{cd} (W/(m^2 \cdot ^\circ C))$	46.1	37.7	43.0	43.1	50.1	44.2

2) 被験者の臀部面積

臀部面積： $A_b (m^2)$ については、事前に30名で実施した予備測定の結果から、BMIとの相関が良いことから、以下の式により被験者のBMIから推定した。

$$A_b = 0.0026 \times BMI + 0.031$$

3) 各被験者の蓄熱量の推定

代謝量 (M)、対流放熱 (C)、放射放熱 (R)、蒸発放熱 (E)、伝導放熱 (Cd) から以下のように非定常状態での人体蓄熱量 (S) を推計する。

$$S = M - C - R - E - Cd$$

以下ではそれぞれの放熱量を求める。プラス側が放熱、マイナス側が受熱を示す。

①対流放熱 C

対流放熱量は、日向の平均で 27.7W/m^2 、仮設テントで 21.7W/m^2 、暑熱対策施設では 14.4W/m^2 となった。暑熱対策施設で放熱量が小さいのは、主に風が弱くなっていることが影響している。

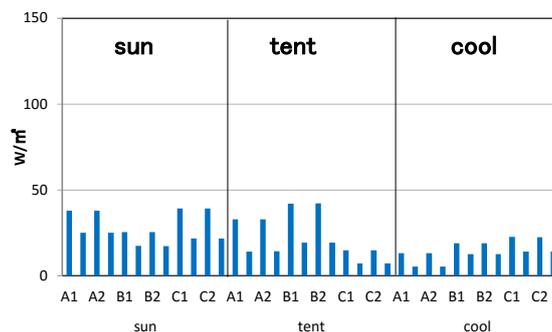


図 10 対流放熱量

②放射放熱 R

放射放熱量は、日向の平均で -106.5W/m^2 、仮設テントで -43.7W/m^2 、暑熱対策施設では 0W/m^2 となった。日向や仮設テントでは放熱せずに逆に受熱していたが、暑熱対策施設では放射環境の改善により ± 0 であった。

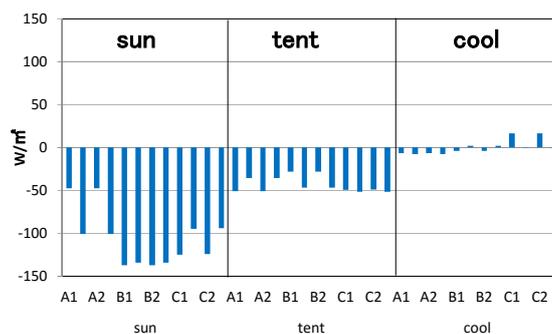


図 11 放射放熱量

③蒸発放熱 E

蒸発放熱量は、日向の平均で 85.2W/m^2 、仮設テントで 50.6W/m^2 、暑熱対策施設では 31.6W/m^2 となった。

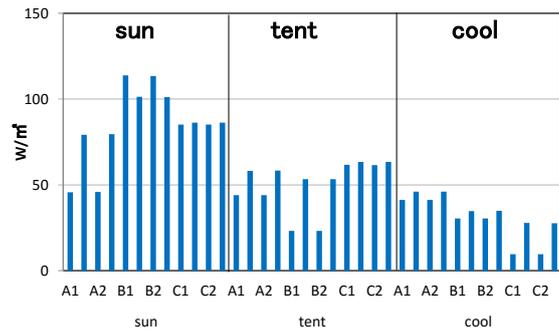


図 12 蒸発放熱量

④伝導放熱 Cd

伝導放熱量は、座面温度・臀部温度を測定していた水冷ベンチに着座した場合のみ推計した。伝導放熱量は平均で $13.2\text{W}/\text{m}^2$ であった。熱コンダクタンスは 1) で求めた $50.1\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ を用いた。

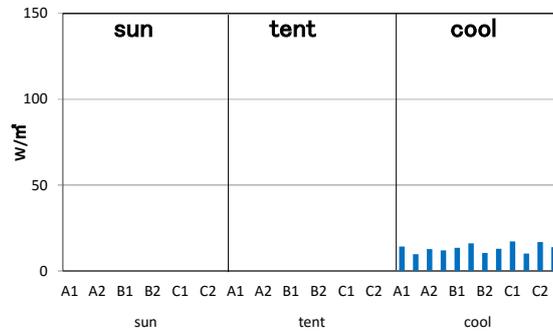


図 13 伝導放熱量

⑤蓄熱量 S

人体の代謝量を $58.2\text{W}/\text{m}^2$ として非定常な状態での蓄熱量を計算すると、日向の平均で $51.8\text{W}/\text{m}^2$ 、仮設テントで $29.7\text{W}/\text{m}^2$ 、暑熱対策施設では $-1.0\text{W}/\text{m}^2$ と、熱平衡がほぼ保たれている状態であった。

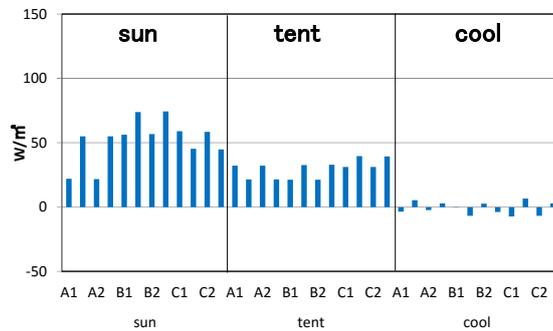


図 14 蓄熱量

4) 水冷ベンチの効果の推定

今回求めた蓄熱量の温冷感等の主観申告、SET*との関係を確認し、水冷ベンチが主観申告やSET*の改善にどの程度、効果があるのかを推定する。

3) で求めた各被験者の蓄熱量と温冷感、快適感との関係を見ると、蓄熱量が多いほど暑い、不快に感じる傾向となっていた。また、蓄熱量が0 (ゼロ) 付近で温冷感、快適感ともに中立になっていた。水冷ベンチへの放熱量は、平均で 13.2W/m²であったことから、水冷ベンチに着座することで、温冷感を 0.82 段階、快適感を 0.60 段階、改善すると推定された。

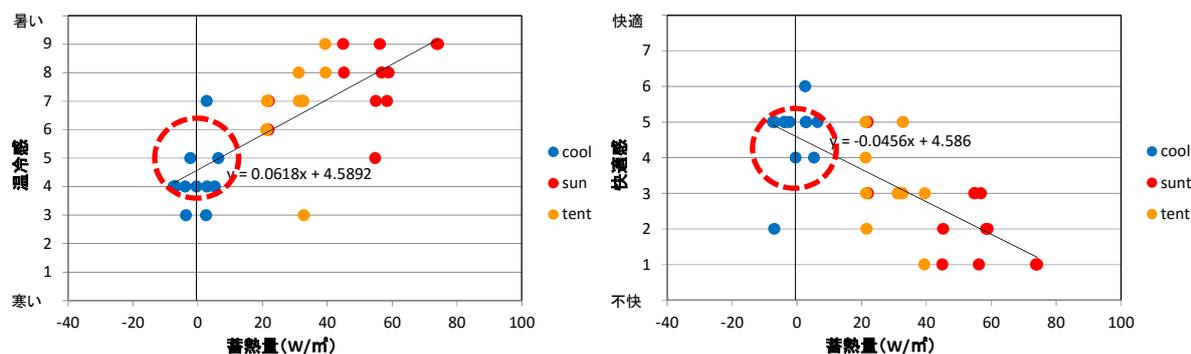


図 15 蓄熱量と温冷感 (左)、快適感 (右)

次に、日向と仮設テントにおける蓄熱量と SET*との関係を見ると、正の関係が見られ、水冷ベンチの放熱量 13.2W/m² は、SET*にして 2.4℃に相当すると推定した。

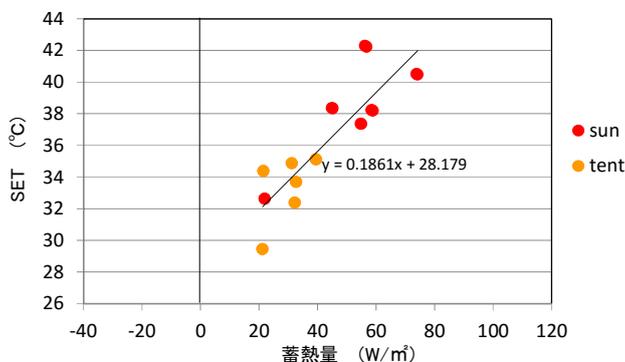


図 16 蓄熱量と SET*

今回の実験で得られた主観申告と SET*との関係 (水冷ベンチの着座時を除く) では SET* 1℃当たり、温冷感は 0.34 段階、快適感は 0.22 段階であることから、SET*2.4℃当りに換算すると、温冷感 0.82 段階、快適感 0.53 段階となり、上で推定した 0.82 段階、0.60 段階とほぼ整合がとれていた。

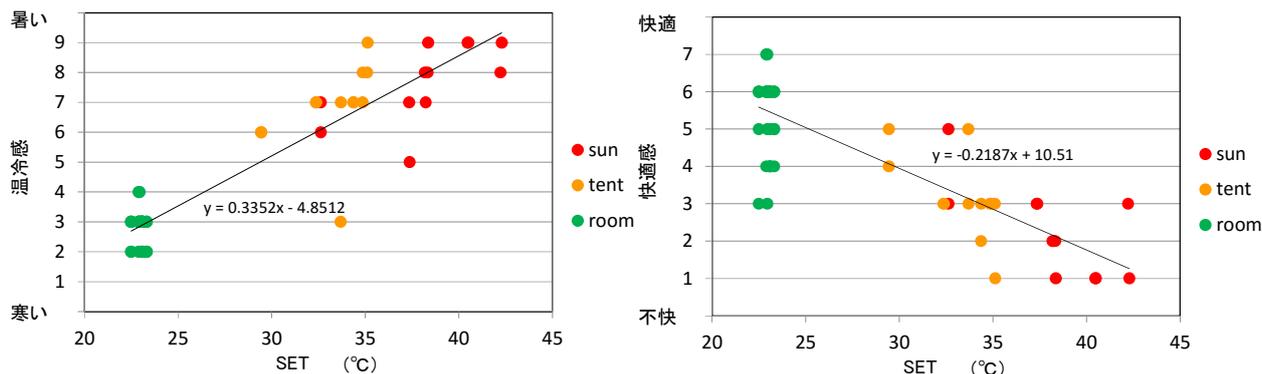


図 17 SET*と主観申告の関係（ただし、水冷ベンチ着座時を除く）

7. まとめ

今回の実験で対象とした暑熱対策施設は、オーニング（遮熱生地）、側面の蒸発冷却ルーバー、床面の保水性ブロックと座面の水冷ベンチで構成されたものである。水冷ベンチの効果を除く施設内の体感温度（SET*）は、日向にくらべて約8℃、仮設テントにくらべても約3℃低くなっていた。

結果は、生理反応としての心拍は、暑熱対策施設では日向にくらべて有意に低下していた。また、発汗量についても同様に暑熱対策施設で日向にくらべて有意に低下していた。

主観申告については、暑熱対策施設での温冷感、快適感、許容度、満足度は大きく改善されており、SET*30℃以上でも温冷感では、「涼しい」側になるなど、水冷ベンチによる直接的な放熱が申告の改善に影響しているものと推察された。

そこで、人体熱収支により水冷ベンチを評価したところ、非定常な状態での人体への蓄熱量は、日向では約50W/m²、仮設テントでは約30W/m²であったものが、水冷ベンチの効果を考慮した暑熱対策施設では蓄熱がなく、熱平衡が保たれていた。水冷ベンチへの放熱量は約13W/m²であったが、今回の実験データからは、SET*にして2.4℃に相当すると推定された。

熊谷市役所前に設置した施設は、水冷ベンチによる直接的な放熱手法を含む複合的な暑熱対策施設であったが、外気温が35℃以上の猛暑においても、暑熱対策施設内では温冷感が涼しい側、快適感も快適側の申告が得られるなど、施設内の熱環境は大きく改善されていた。今後、気候変動により夏の厳しさが増す可能性があるが、暑熱対策技術を適切に組み合わせることで、屋外空間においても健康的で快適な空間を創出できることが示された。