

# 多治見街区における 被験者の動線に沿った温熱生理実験

## OBSERVATION OF THERMAL ENVIRONMENTS AND HUMAN PHYSIOLOGICAL RESPONSES ALONG SUBJECTS' PATHWAYS IN TAJIMI CITY

石蕊<sup>1</sup>・仲吉信人<sup>2</sup>・神田学<sup>3</sup>・宮本賢二<sup>4</sup>

Rui SHI, Makoto NAKAYOSHI, Manabu KANDA and Kenji MIYAMOTO

<sup>1</sup>学生会員 工修 東京工業大学 理工学研究科国際開発工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1 石川台4号館)

<sup>2</sup>正会員 工博 東京工業大学 理工学研究科国際開発工学専攻 特任助教 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1 石川台4号館)

<sup>3</sup>正会員 工博 東京工業大学 理工学研究科国際開発工学専攻 教授 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1 石川台4号館)

<sup>4</sup>非会員 多治見市役所環境文化環境課 統括主査 (〒507-8703 岐阜県多治見市日ノ出町2丁目15番地)

We produced a portable and handy measurement system, which can measure both meteorological (air temperature, humidity, long and short wave radiation, wind velocity) and physiological (skin temperature, tympanic temperature, pulsation, rate of acceleration, thermal sensation) parameters. Using this measurement system, an observation along subjects' path ways was conducted during summer, from August 22-24, 2011, at the city of Tajimi, Gifu Prefecture, which is one of the hottest locations in Japan.

From this observation, 1) detailed thermal environmental and physiological maps were made, which can detect localized hot and cool spots and their impacts for human health, 2) the close relation between subjects' movements and conductive heat loss from their bodies was found. When they stopped walking, since their metabolic heat still remain higher, it could cause tympanic temperature increased, 3) sweat rate had a correlation with the thermal load (SET\*). The gender and BMI were also found to influence on the physio-meteorological relationships mentioned above.

**Key Words:** Human Physiological Responses, Wearable Measurement System, Human Path Way  
Outdoor Thermal Environment, Outdoor Observation, Heat Stroke

### 1. はじめに

近年ヒートアイランドによる都市高温化, およびそれに伴う熱中症罹患患者数の増加が問題視されている。熱中症リスクの評価, 予防のために, 人間生活空間での詳細な熱環境, 及び熱環境と人間健康の関係の把握が期待されるが, 社会的制約などから都市街区での計測は容易ではない。

熱環境と健康の関係については, 室内実験が多く<sup>1)</sup>, 屋外での適用例は極めて少ない<sup>2) 3)</sup>。屋外は室内と比べ, 気温, 日射, 風速などの変動が大きく, 室内実験環境とは異なる空間であるため, 屋外熱環境と人体健康の影響

を調べることは重要である。

屋外での温熱生理研究が進んでこない原因として, 我々は, 測器の可搬性・携帯性に問題があることを指摘し, 気象因子と生理因子を計測可能な人体装着型の温熱生理計測システムの開発を行ってきた<sup>4) 5)</sup>。本報では, 開発した人体装着型温熱生理計測システム, および計測システムの応用例として, 2011年8月22日から24日にかけて岐阜県多治見市で実施した多人数被験者実験の結果について報告を行う。多治見は熊谷と並び, 日本で一番暑い町と言われている。本報告は, 筑波大学, 多治見市と猛暑解明および温熱生理評価のため行っている共同研究成果の一部となる。

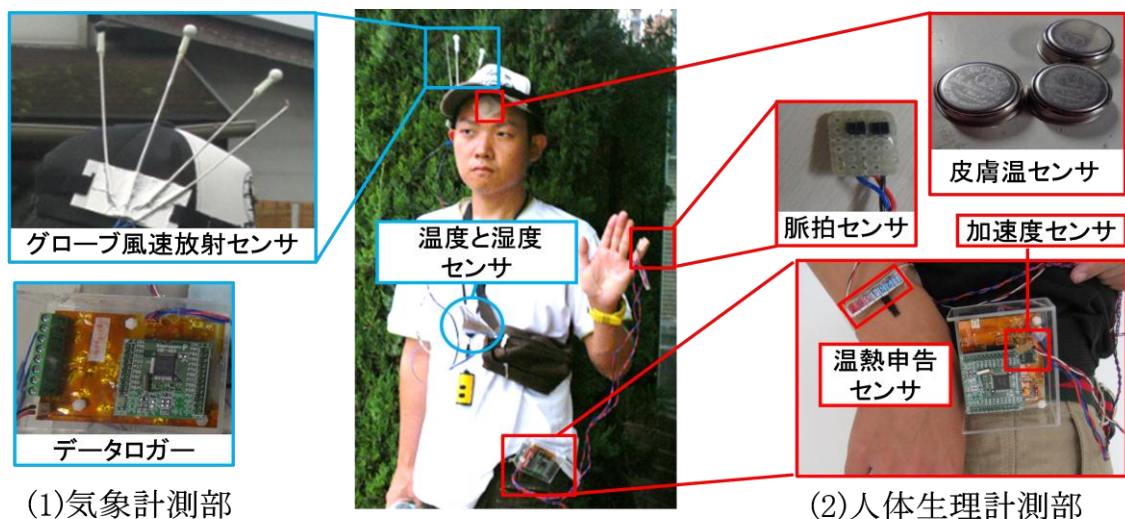


図-1 人体装着型計測システム装着例

表-1 計測項目

| 気象計測部    |                  |                        | 人間生理計測部     |                                       |                     |
|----------|------------------|------------------------|-------------|---------------------------------------|---------------------|
| 計測項目     | 使用機器             | 精度                     | 計測項目        | 使用機器                                  | 精度                  |
| 気温(Ta)   | K type, 熱電対      | $\pm 0.2 \text{ K}$    | 皮膚温度(Tskin) | Thermochron, SL type, KN Laboratories | $\pm 0.7 \text{ K}$ |
| 相対湿度(RH) | SHT75, Sensirion | $\pm 1.8 \%$           | 鼓膜温度(Tcore) | MC-510(非接触型温度計), オムロン                 | $\pm 0.1 \text{ K}$ |
| 風速       | グローブ風速放射センサ      | $0.32 \text{ ms}^{-1}$ | 脈拍 (PR)     | Handmade                              | N/A                 |
| 短波放射(S)  |                  | $21.8 \text{ Wm}^{-2}$ | 体動量         | KXM52-1050, Kionixinc                 | N/A                 |
| 長波放射(L)  |                  | $10.9 \text{ Wm}^{-2}$ | 発汗量(SW)     | CG-100KF, 新光電子                        | $\pm 5 \text{ g}$   |

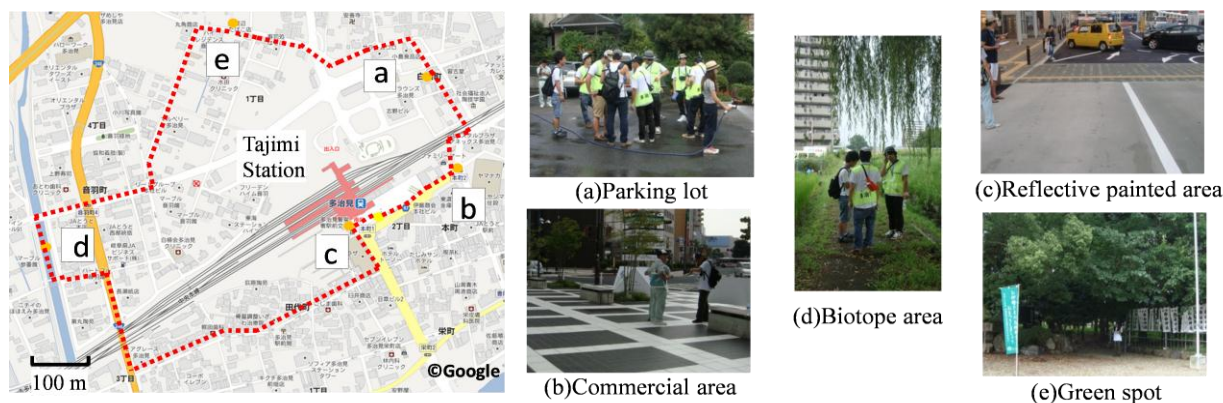


図-2 観測ルートおよび各ポイントの様子

表-2 被験者情報

| Date  | 年齢層   | 性別     |        | Body Mass Index |            |              |
|-------|-------|--------|--------|-----------------|------------|--------------|
|       |       | 男<br>M | 女<br>F | 痩せ<br>UW*1      | 標準<br>ST*2 | 太り気味<br>OW*3 |
| 8月22日 | 30-40 | 4      | 5      | 1               | 6          | 2            |
| 8月23日 | 20-30 | 6      | 2      | 0               | 6          | 2            |
| 8月24日 | 50~   | 4      | 5      | 1               | 8          | 0            |

\*1:Underweight, \*2:Standard weight, \*3:Overweight

## 2. 人体装着型計測システム

人体装着型温熱生理計測システム(図-1)は、(1)気象計測部と(2)人体生理計測部からなる。この計測システムの利点として：①個々人が実際に曝される熱環境とそれに伴う生理応答の評価が可能になること、②人体への熱負荷履歴の評価が可能になること、③都市街区、地下鉄

など、観測機器設置の難しい箇所においても自由な観測が行えることが挙げられる。

今回の実験で評価した計測項目などの情報を表-1に示す。皮膚、鼓膜温度（非接触型温度計）および発汗量評価に用いたセンサ以外は仲吉ら<sup>4,5,6)</sup>により開発されたものを使用した。

### (1) 気象計測部

温熱環境に関連した全ての気象因子の計測が可能である。風速、長波・短波放射量の計測に関しては仲吉らのグローブ風速放射センサ<sup>5)</sup>を用いた。気温と湿度の測定は放射の影響を防ぐために、放射シールドを自作し使用した。全てのセンサは自作の小型データロガーに接続される。精度については表-1を参照されたい。

### (2) 人体生理計測部

本機器により、温熱生理研究で重要となる因子を連続計測可能となる。脈拍は発光受光ダイオード素子を用い、拍動に伴う容積脈波の変化を周波数解析し算出する<sup>5)</sup>。体動量は、3軸加速度センサ信号を周波数解析し評価する。皮膚温は工業用のボタン型温度ロガーを人体計測用に改良し、評価する。皮膚とセンサ間を断熱フィルムで覆い、外気温の影響を除外した上で、Hardy & Duboisの7点法<sup>7)</sup>に基づき平均皮膚温度を算出する。発汗量は精度5gの高精度電子台秤を用い、水分摂取量を加味した観測前後の体重差から評価した。温熱感申告センサは可変型抵抗を用い、ASHRAEの7点スケールに基づいた申告値を記録する。

## 3. 実験概要

2011年8月22日から24日にかけて、多治見駅周辺の図-2で示すルートにおいて、各日、朝(8:00-10:30)、昼(12:30-15:00)、夕方(16:00-18:30)と計三回の実験を実施した。被験者の情報を表-2に示す。

実験の実施手順を以下に記す。

- ① 多治見市役所の個室にて、被験者は裸体体重の測定を行い、着衣後にセンサを装着する。
- ② 被験者は二人一組で行動し、図-2に示す5つのポイントへグループ毎に移動する。各グループの最初の移動先はグループ1から5の順にそれぞれ、(a)駐車場、(b)駅前商業地域、(c)高反射塗料歩道、(d)ビオトープ、(e)都市緑地である。なお、各グループには一人の補助者をつけ、安全管理及び各ポイントでの発汗感、温熱感申告及び鼓膜温度の計測補助を行う。
- ③ 全グループがポイント到着後、その場で5分間静止し、1分ごとに発汗感、温熱感申告及び鼓膜温度の測定を行う。被験者は5分間静止後、次のポイントへ移動する。移動は現地点から時計回りに行う。

- ④ 全グループが次のポイントへ到着後、③に記した測定を再度行う。各グループが全てのポイント経由後、観測は終了し、個室に戻り汗を拭い裸体体重を計測する。
- ⑤ 被験者は次の観測まで中立温熱環境の室内にて待機する。

## 4. 結果と考察

図-3は8月24日朝の被験者(ID4)の観測データの時系列を示している。計測データは全て1分平均値となっている。破線領域は静止ポイントで、アルファベットは図-2のそれと対応する。本計測システムから、このような被験者の動線に沿った詳細な気象と生理データが得られる。一見して、データ変動の大きさを確認できる。実験エリアは700 m四方とそれほど広くない。上記変動は市街区の熱環境の空間的局所性を表す例である。

### (1) 被験者動線に沿った温熱生理マップ

被験者動線に沿った温熱生理マップからは都市街区内の詳細な熱環境および健康リスクの可視化が可能となる。図-4は24日朝の実験結果を可視化したものである。図-4[1]に被験者動線に沿って計測された気温と多治見アメダスの偏差を取ったものを示す。温度差は5℃以上と小さくない。また、ビオトープや都市緑地（図-4[1]白丸領域）を除き、都市市街区ではアメダスよりも高温となっていることが確認できる。アメダスの観測値で都市街区の熱環境を評価する事の難しさを示している。さらに図-4[2]を併せて見ると、高温域（赤丸領域）は日射受光量の大きい地域と良く対応することが確認される。

図-4[3]と[4]はそれぞれ新標準有効温度（SET\*<sup>8)</sup>）と被験者の平均皮膚温（T<sub>skin</sub>）を図示したものである。SET\*とは体感温度の一つであり、温熱要素の気温・相対湿度・風速・放射量に加え活動量、着衣量も考慮した人体熱負荷指標である。実在環境で人体が曝される熱負荷と等価な熱負荷を受ける仮想室内環境（相対湿度50%、風速0m/s、着衣量0.6clo、座位時の活動量）の平均放射温度として定義される。熱負荷が大きくなると皮膚温度も高くなる傾向が確認される。両者の関係は別の項で詳しく記述する。

### (2) 生理量の過渡変化

ここでは被験者の運動状態の変化に伴う生理の過渡変化について考察する。まず図-3[4]風速と[5]体動の関係に注目する。両者は非常に良く対応している。全被験者26個のデータのうち20事例で風速と体動の関係が確認された。一般的に都市キャニオン内の風速は弱く、被験者の歩行により相対的に体感風速が増していることを示唆している。さらに静止ポイント（図-3中の黒破線囲いエ

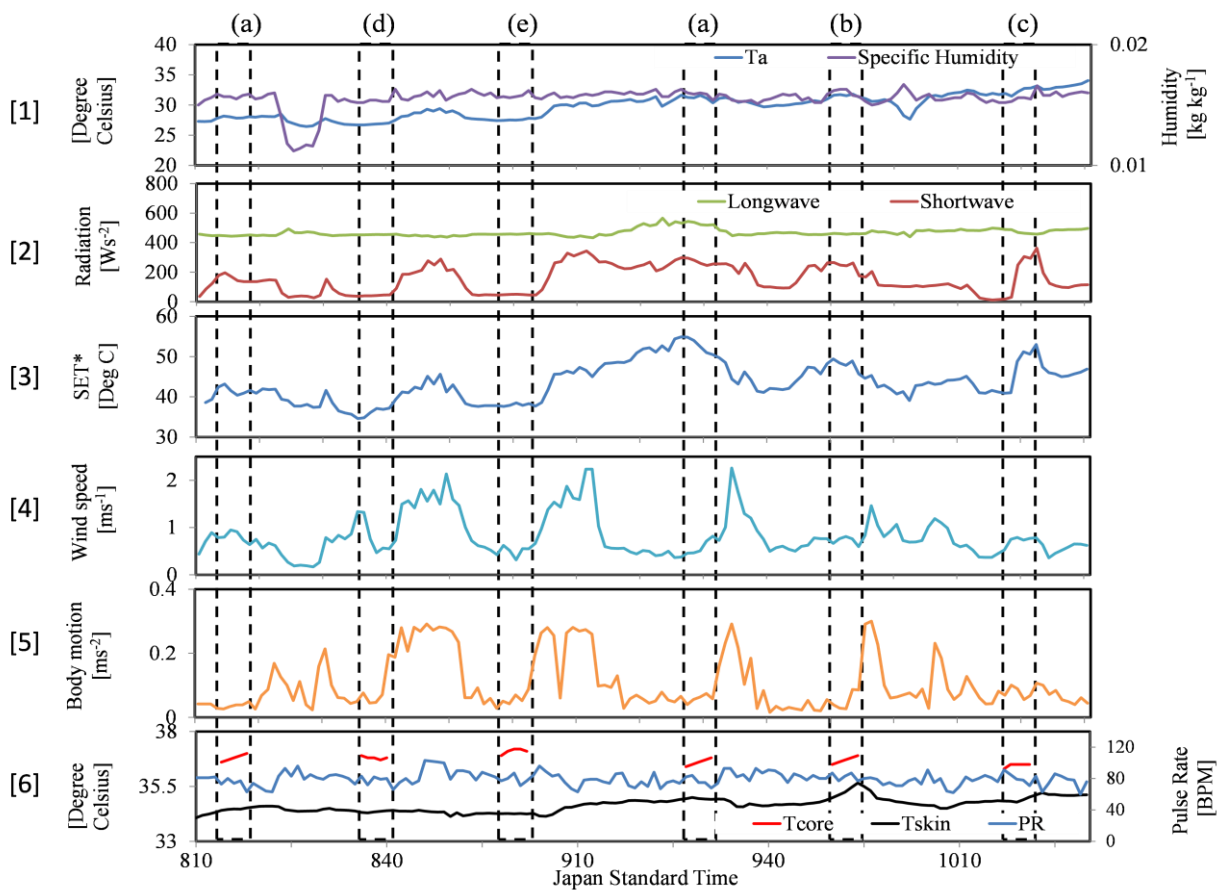


図-3 8月24日朝被験者（ID4）の動線に沿った気象と生理データの時系列  
 [1] 気温と比湿, [2] 短波・長波放射, [3] SET\*, [4] 風速, [5] 被験者id4の体動,  
 [6] 被験者id44の平均皮膚温度, 鼓膜温度および脈拍

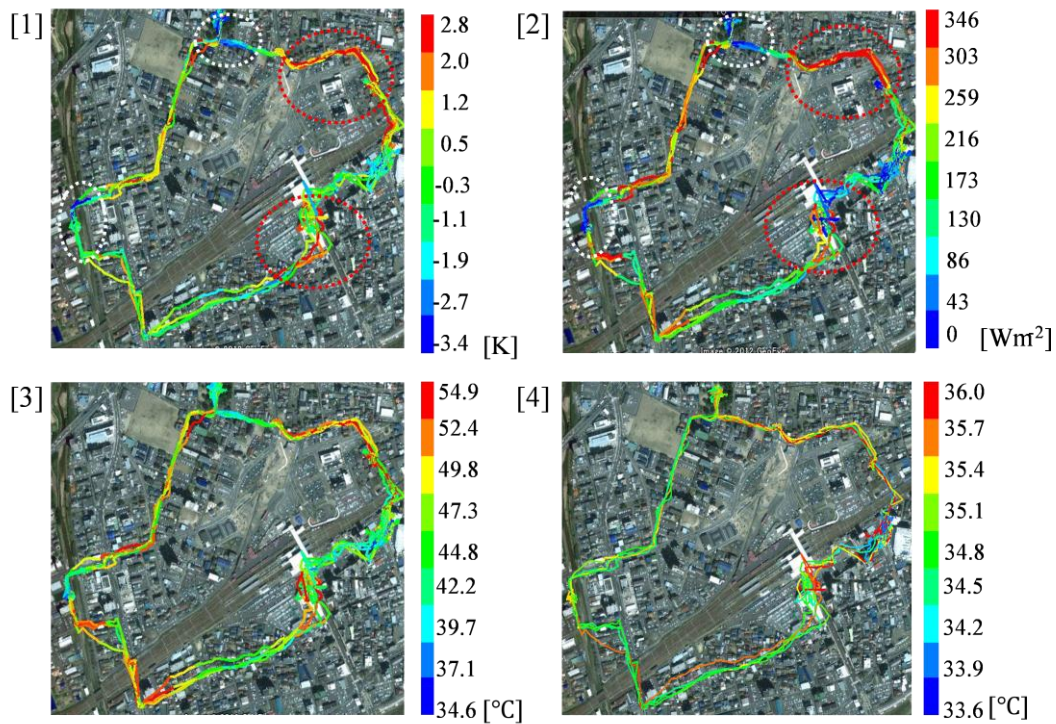


図-4 観測者動線に沿った温熱生理マップ（8月24日朝）  
 [1] 多治見アメダスから観測気温の偏差, [2] 観測短波放射, [3] SET\*, [4] 被験者の平均皮膚温度



リア)における鼓膜温度(図-3[6]Tcore)の変化に注目すると、静止している5分間に上昇する傾向が確認される。このようなイベントは388事例のうち212を確認されている。歩行に伴う体感風速の増加が効率的な熱放散を可能にする一方、静止後は都市街区内の低風速により熱放散が低下する。これまでの歩行による熱負荷と運動履歴と相まって、鼓膜温度の上昇に繋がったと考えられる。これは、屋外での運動状態から、静止・休息に入った直後が、深部体温の上昇つまり熱中症リスクが高まることを示唆しており、休息時は、日向にとどまらず、日陰の風通しの良い場所に速やかに移動する必要がある。

上で述べた運動状態の変化に伴う鼓膜温度の変化については、今年度の追加実験においても確認されている。そこでは、4人の被験者に、1秒での連続計測可能な深部体温センサ(LT-200S, グラム社)を装着し、10分歩行からの静止で深部体温の変化を調べた。図-5より、全被験者において歩行中、深部体温は上昇し、静止後も上昇が継続することが確認される。

また、平均皮膚温度(図-3[6]Tskin)は熱環境(気温、

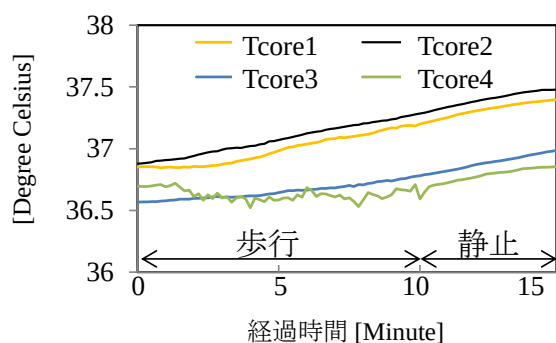


図-5 検証実験の結果

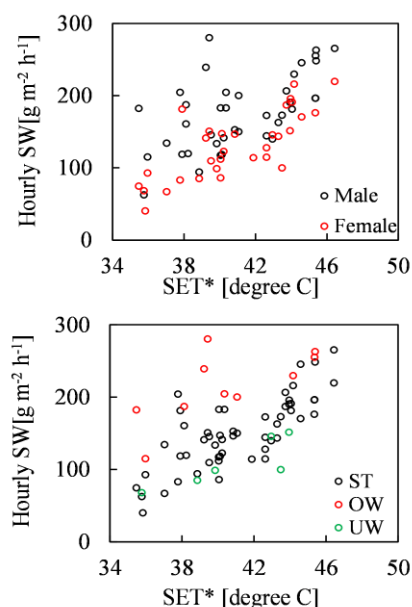


図-6 発汗量とSET\*の関係

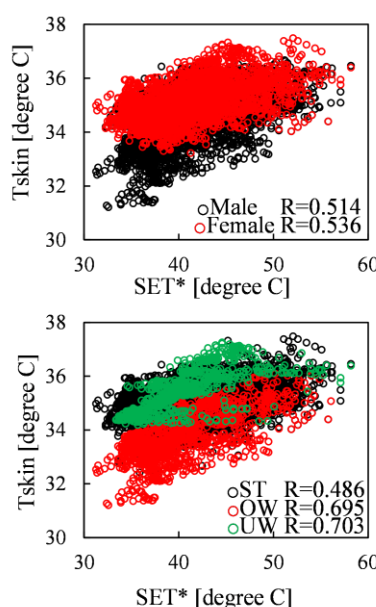
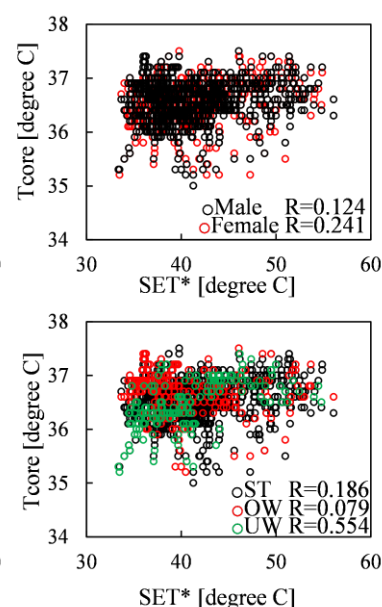


図-7 平均皮膚温および鼓膜温度とSET\*の関係(Rは相関係数)

ST: Standard weight, OW: Overweight, UW: Underweight.



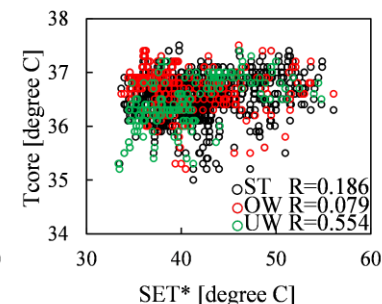
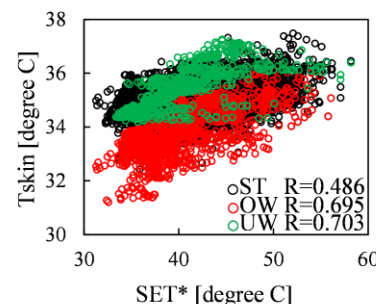
日射量)と似た変動特性を持っているが、変動スケールは小さい、これは人体の熱容量がバッファとして作用するためと考察される。

### (3) 熱負荷量と生理因子の関係

ここでは熱負荷量と発汗量、皮膚温度、鼓膜温度の関係について考察する。図-6は観測中のSET\*と被験者の体面積で規格化した毎時発汗量(Hourly SW, 以後発汗量と称する)を示している。図-7はSET\*と平均皮膚温、および鼓膜温度の関係及びその相関係数を示している。それぞれの図は性別差とBMI差に分けて整理している。発汗量と平均皮膚温はSET\*に関係していることが分かる。ただし、プロットにばらつきが存在する。この分散を引き起こす要因としては性別、BMIおよび年齢の違いから考察する。

まず、性差について、図-6から男性は女性より発汗が多い傾向が確認される。その差は平均 $47.3 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ となる。そして発汗量の性差は室内実験<sup>9), 10)</sup>でも多数報告されており、男性は発汗能が女性よりも高く、また発汗が生じる閾値温度も高い。また、平均皮膚温に注目すると、男性の平均皮膚温は女性よりも平均で $0.6^\circ\text{C}$ よりも低い傾向を示している。t検定の結果、これは有意な差であることが確認された(紙面の都合上、詳細は割愛)。発汗量が多く、それに伴う気化熱による熱放散が多いことが、男性の皮膚温度の低下に繋がっていると考えられる。一方、鼓膜温度には顕著な性差は確認されなかった。発汗量の大小で人体の熱負荷が解消され、男性・女性とも過度な深部体温の上昇に繋がっていない可能性が挙げられる。

次に、BMI差について、太り気味(OW)の被験者は



痩せ気味 (UW) の被験者よりも平均 $111.7 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  の発汗量が多く、図-7から太り気味 (OW) とされる被験者は他のグループ (標準ST, 痩せUW) よりも発汗が多くなる傾向となっていることが確認された。太り気味とされる被験者は、脂肪が毛細血管と大気との間で断熱層の役割を果たしているため、顕熱放散が低下する。また、太り気味の被験者は標準体重また痩せ型の被験者と同じ歩行をしても、脂肪が重りの役割を果たすため、運動強度が大きいことが予想される。これらのことが、太り気味の被験者の熱負荷に繋がり、発汗上昇に繋がったと考えられる。また、上記性別での議論と同様に、発汗の多いグループ (肥満とされる被験者) の平均皮膚温は低く、痩せ型のグループに比べその差は平均で $1.8^{\circ}\text{C}$ となっており、t検定からも有意な差であることが確認された。なお、鼓膜温度に目立った差異は確認できなかった。

最後に、年齢差に有意な結果が見られなかったことを言及しておく。既往研究では、発汗能の年齢差は多く報告されており、年齢差が確認されなかった可能性として、今回実験に協力してくれた50代以上の被験者全員が定期的な運動習慣を持つこと、熱中症リスクを伴う夏季の温熱実験に参加意思を表明する被験者は、一般的な50代よりも健康であることなどが考えられる。

## 5. 結論

開発した人体装着型温熱生理計測システムを用い、2011年8月22日から24日に岐阜県多治見市にて、被験者動線に沿った屋外温熱生理実験を実施した。本実験の主要結果を以下に記す。

1. 人体動線に沿って、都市街区内の詳細な温熱生理データの可視化を行った。温熱生理マップより、高温・冷涼スポットの抽出、その形成要因を議論し、また、生理因子への影響を示した。
2. 被験者の動きと人体からの熱放散に密接な関係があることが確認された。風速の低い都市街区内では、人の歩行が体感風速を増し、人体熱放散を効率化させていた。そのため、歩行を停止することによって、それまでの運動履歴と相まって、鼓膜温度の上昇を引き起こす事例が多数確認された。
3. 発汗量とSET\*に相関が確認された。また、性別とBMIごとの傾向の違いも確認された。男性被験者は一般的に女性より発汗量が多く、太り気味の被験者では普通と痩せ気味の被験者よりも発汗量が多かった。また、発汗量の多い被験者は、蒸発潜

熱による効率的な熱放散により、皮膚温が低下する傾向を示した。

**謝辞：**本研究は、気候変動適応研究推進プログラム (代表：飯塚 悟) から金銭的援助を受けて実施されたものである。また、岐阜県多治見市役所環境課職員の方々には、観測ポイントの選定、被験者募集など多くの協力を頂いた。この場を借りて感謝したい。

なお、本観測は、東京工業大学疫学研究倫理審査委員会の承認を得て実施されたものであることを付記しておく。

## 参考文献

- 1) Niimi, Y., Matsukawa, T., Sugiyama, Y., Shamsuzzaman, A.S.M., Ito, H., Sobue, G., Mano, T.: Effect of heat stress on muscle sympathetic nerve activity in humans, *Journal of the Autonomic Nervous System*, pp. 61-67, 1997.
- 2) 神田学, 木内豪, 小林裕明: 新しい屋外用温熱感指標による河川の熱環境評価—多摩川河川敷における観測を例に一, 水工学論文集, Vol. 40, pp. 237-242, 1996.
- 3) 木内豪: 屋外空間における温冷感指標に関する研究, 天気, Vol.48, No.9, pp. 11-21, 2001.
- 4) 仲吉信人, 神田学: ラグランジュアン人間気象センサの開発, 水工学論文集, Vol. 54, pp. 271-276, 2010.
- 5) 仲吉信人, 石蕊, 神田学: 3球の小型グローブ温度計を用いた放射・風速センサの開発, 水工学論文集, Vol. 55, pp. 349-354, 2011.
- 6) 仲吉信人: 人の動線に沿った熱環境・温熱生理評価のための人体装着型計測システムの開発と応用, 東京工業大学国際工学専攻博士論文, 2012.
- 7) Hardy, J. D., Dubois E. F.: The technique of measuring radiation and convection, *Journal of Nutrition*, Vol. 15, pp.461-475, 1938
- 8) Gagge, A. P.: An Effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response, *ASHRAE Transactions* 77(1), pp. 247-262, 1971.
- 9) Fox, R. H. et al: Comparison of thermoregulatory function in men and women, *J. Appl. Physiol.* Vol. 26, pp. 444-453, 1969.
- 10) Cunningham, D. J., Stolwijk, J. A. J. and Wenger, C. B.: Comparative thermoregulatory responses of resting men and women, *J. Appl. Physiol.* Vol. 45, pp. 908-915, 1978.

(2012. 9. 30受付)