

暑熱環境下における空間利用の違いによる人体生理・心理反応の評価に関する研究

Study on Evaluation of Human Physiology and Psychological Reaction by Difference of Space Utilization at Thermal Environment

三坂 育正*・成田 健一*

Ikusei MISAKA and Ken-ichi NARITA

要旨：屋外空間を利用する際に適した温熱環境条件を抽出する手法を確立することを目的として、温熱環境と人の生理・心理指標、作業効率に関する実験を行った。暑熱環境対策により、温熱快適性の向上や人体生理・心理反応への効果を検証することができたが、作業効率の向上については確認できなかった。また、作業時は着座時に比べて作業に集中することが想定され、温熱環境や人体生理に変化が生じた状態でも感度が低下する傾向が推測された。実験結果より、屋外空間で推奨される温熱環境は、空間の利用目的によって異なる可能性があることが推察された。

キーワード：暑熱環境、温熱快適性、空間利用、人体生理・心理反応、作業効率

Abstract : Experiments were conducted on the thermal environment, the physiology, psychological index of human beings, and work efficiency with the aim of establishing a method of extracting thermal environmental conditions suitable for outdoor space use. It was assumed that work was focused on work at the time of work, compared with when sitting, and the sensitivity tended to decrease even changes in the thermal environment and the human physiology. From the results of experiments, it was presumed that the suitable condition of thermal environment in the outdoor space may be different depending on the space utilization.

Key Words : thermal environment, thermal comfort, space utilization, human physiology and psychological reaction, work efficiency

はじめに

近年、ヒートアイランド現象や地球温暖化の影響で、夏季における都市の気温上昇が顕著となっており、健康への影響、具体的には人の熱ストレス増大の影響は大きく、ヒートアイランド緩和に向けた対策は急務といえる。ヒートアイランド緩和に向けた対策を進めていく中で、環境省(2012)では、人の熱ストレスによる健康影響などの影響を限りなく軽減していく適応策の推進を挙げている。

ヒートアイランド対策の適応策は、人の熱ストレスの軽減に着目し、熱中症や睡眠阻害などの健康影響を受けないことを目的としている。しかしながら、都市の屋外空間を人が活用するためには、夏季日中でも温熱環境的に快適な空間を創出することが重要である。人が屋外空間を使う場合、その利用目的により要求される空間の温熱環境が異なることが想定されるが、利用目的に応じたあるべき温熱環境は明確となっていない。また、屋外温熱環境を考慮した屋外空間の設計手法として、従来計画と対策実施後の気温や温熱快適性の違いを評価する事例は見られるものの、その値が空間を活用するために適している根拠を示したものは無く、屋外空間の利用目的に応じた熱環境の設計手法が十分に確立されているとは言えない。

夏季屋外における温熱環境が人体の生理・心理に与える影響に関して、日向と日陰では運動時の人体生理・心理に与える影響が異なり、その影響が高齢者と若年者で異なることなどを明らかになっている(Tsuzuki et.al. 2016)。また、安藤ら(2011, 2012)は、屋外をオフィスとして利用する空間やアメニティ空間における調査より、利用人数・時間から空間利用に適した温熱環境の閾値の可能性を示しており、藤原ら(2016)や三坂ら(2017a)は、暑熱環境下の空間利用者数の分布特性から、適した温熱快適性指標 SET*を評価する手法を提案している。さらに、中野(2015)は、半屋外空間の駅構内の温熱環境に関して、利用者の受容の観点から SET*19~32℃の熱的受容域を提案している。

以上の研究から、空間の利用目的に応じて、温熱快適性の閾値となる値が存在する可能性を見出されており、屋外空間のより積極的な活用を推進するには、利用目的に応じた温熱環境を設定し、対策技術を適材適所に配置することで、空間利用に適した温熱環境設計手法の確立が重要な課題であると考えられる。住宅や事務所建築における屋内空間の設計では、気温の設定条件(例えば28℃など)を定めてパッシブな手法や空調設備の設計が行われており、近年では、通風用ファンや放射冷暖房などを用いて、温熱快適性指標 SET*を用いてASHRAEの快適範囲を満たすための

* 日本工業大学 建築学部 建築学科

設計も行われている。今後、積極的に活用する屋外空間を創出していくためには、屋内空間と同様に、目標となる温熱環境の値（範囲）を設定し、それを満足するような設計手法を確立することが必要と考えられる。

そこで、本研究は、人が利用する屋外空間の温熱環境と人の生理・心理指標等に関する実験を行うことで、屋外空間を利用する際に適した温熱環境条件に違いが生じる可能性について確認することを目的として実施した。最終的には、人の熱ストレスを考慮した屋外空間の温熱環境として許容できる、あるいは推奨される値を利用目的別に導き出すことで、空間設計時の対策検討に有効に活用されることを目標としており、本研究は、その基礎データを蓄積する段階と位置付けるものである。

1. 研究の方法

1.1 実験概要および場所・空間

実験は、埼玉県南埼玉郡宮代町にある大学キャンパス内にある建物1階の室内および隣接する広場において、暑熱対策施設を設置して行った。実験場所ならびに暑熱対策施設の設置位置を図-1に示す。

実験は、被験者による日向・暑熱対策空間を対象とした温熱環境、人体生理・心理反応、作業効率、および人体熱収支に関する測定から構成される。暑熱対策施設はA～Cの3つとした。対策Aは遮熱性の高い白色の膜を使用したオーニングで、南東側側面に流下する水の気化熱で冷却するパッシブクーリングルーバー（以下、PCルーバー）、床面には遮熱性ウッドデッキを設置し、さらに上部より微細ミストを噴霧した。対策Bはテントの周囲を親水性を有する不織布を周囲に設置し、この不織布に上部から水を流して側面の冷却を可能とする空間とした(三坂ら 2016)。対策CはAと同様に遮熱性の高い緑色の膜を使用したオーニングとした。各空間とも、空間の中央付近に机と断熱材を座面に置いた椅子を設置した。暑熱対策A～Cと日向を加えた4パターンの空間の配置を図-2に示す。

1.2 被験者実験

被験者を対象とした実験は、気温28℃設定とした空調された室内空間に滞在後、暑熱対策空間A、B、Cと日向で分かれ、それぞれの温熱環境下で着座、軽作業を行い、温熱環境が人体に与える影響について評価を行った。

実験期間は、2017年8月9～10、12～13、20～21日の計6日間とし、被験者は暑熱対策空間を日ごとに変更し実施した。被験者は、20歳前後の健康な男性とし、8月9～13日は1グループ2名の4グループの計8名、8月20～21日は1グループ1名の4グループ計4名で実施した。屋内・屋外の着座時間は20分とし、1日の実験で1人の被験者が

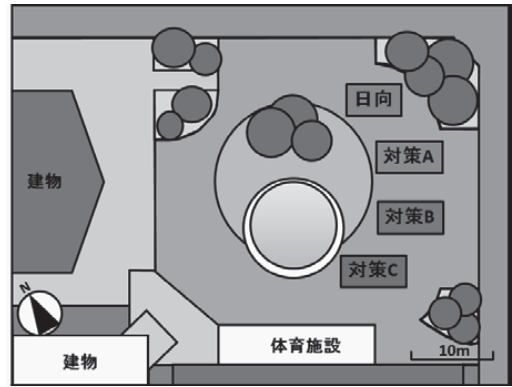


図-1 実験場所と暑熱対策施設の配置

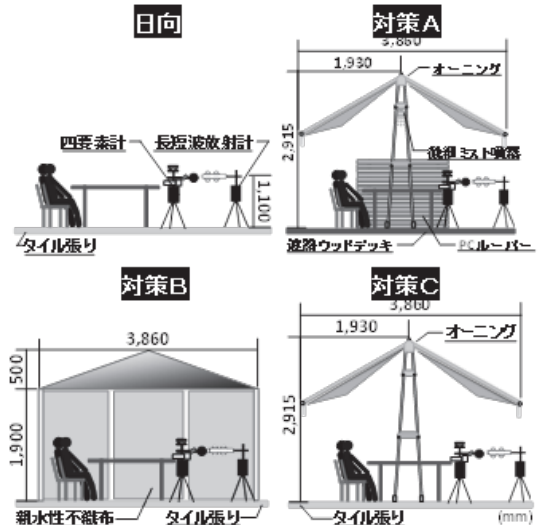


図-2 暑熱対策施設概要と測定機器の設置断面図

表-1 被験者実験の1日の流れ

	11:00	11:20	11:28	11:48	12:25	12:40	12:48	13:03	13:11	13:26	
実験準備	20分	8分	20分	8分	24分	5分	15分	8分	15分	8分	15分
屋内着座		体重測定 + 移動	日向着座	移動 + 体重測定	休憩	体重測定	屋内作業	体重測定 + 移動	日向作業	移動 + 体重測定	屋内着座
			対策A着座						対策A作業		
			対策B着座						対策B作業		
			対策C着座						対策C作業		

同一の屋外空間で、最初の屋外着座時では着座のみ、2回目では作業を行った。1日の実験の流れを表-1に示す。

1.3 測定方法

1) 温熱環境

温熱環境の測定項目と機器を表-2に示す。温熱環境は、日向および各暑熱対策空間の椅子に近い部分に、高さ1,100mmにセンサーがくる様に設置した。温熱環境の評価については、標準新有効温度SET*を算出して行った。屋外の温熱環境を評価する指標としてWBGTやUTCIなどを挙げることはできるが、本研究の目的である空間利用の違いを評価するには、人の代謝や着衣を考慮した評価が必要

となることから、SET*を指標として採用することとした。SET*は、主に室内における温熱快適性指標として用いられ、人体の日射吸収や高風速域での精度に課題がみられるものの、建築分野では屋外・半屋外の評価指標として活用され、その有用性も確認されているため用いることとした。

なお、温熱環境の測定は1秒間隔で行い、解析に当たっては1分平均値を用いることとした。

2) 人体生理・心理反応

人体生理反応については、心拍数、皮膚温度、深部体温(耳内温度)、発汗量を測定した。発汗量については、体重測定によりその変化量から算出した。人体心理反応に関しては、日本建築学会規準(2014)に従い、温冷感、湿度感、気流感、日射感、快適感、満足感、許容度、体感温度等についてアンケートを行い評価した。また、ストレス値は酒井(2002)による「自覚症しらべ」で評価を行った。人体生理・心理反応の測定項目と測定方法を表2~3に示す。

3) 作業効率

本実験の作業として四則演算とした。被験者に対して、四則演算として2桁×2桁の和、差、積、3桁×2桁の商を4題ずつ計100題とし、10分間の回答時間における正答率を指標とした。正答率の違いから暑熱対策技術が作業効率に与える影響を解析することとした。

2. 結果

2.1 温熱環境

温熱環境の結果として、実験期間を平均した気温と日射量の経時変化を図3に示す。気温はミストを噴霧した対策A以外は、日向も含めて大きな差は見られなかった。一方で、日射量は、日向が約800(W/m²)を上回る中、テントを設置した対策Bは約150(W/m²)、遮熱性の高い膜を使用したオーニング下の対策A・Cでは約30(W/m²)程度に抑えられており、いずれも日射遮蔽の効果がみられた。

平均SET*の経時変化を図4に示す。SET*は日向が一番高く、それに次いで対策B、C、Aの順となった。日向に比べ対策Aでは約7℃、対策Bでは約3℃、対策Cでは約6℃の差が生じている。その要因として、日射遮蔽効果の違いによる放射環境改善の影響が考えられる。そこで、図5に対策A~Cの地表面温度とテント・オーニングの表面温度と日射透過率の関係を示す。各対策の日射透過率は8~28%と小さく、日射遮蔽効果が大きいことがわかる。地表面温度は、透過日射に加えて散乱日射の影響で、周囲が開かれている対策Cが高くなっているものと考えられる。オーニング表面温度も対策Cが最も高く、このオーニングの色が緑色のため日射吸収の影響と考えられる。これらの日射透過特性やオーニングや地表の表面温度の違いが日射

表-2 温熱環境の測定項目と機器





測定項目	測定機器図	測定機器	測定間隔
温湿度		強制通風式温湿度計 (PVC-03)	1秒
風速		2次元超音波風速計 (Wind Sonic PGWS-100)	1秒
黒球温度		グローブ温度計 (PGT-02)	1秒
長短波放射量		長短波放射計 (EIKO MR-50)	10秒
表面温度		サーモカメラ (FLIR T640)	適宜

表-3 人体生理反応の測定項目と方法

測定項目	測定機器	測定間隔
心拍数	腕時計型心拍計 (Polar A360)	1秒
皮膚温(7点)	携帯型精密温度計 (Gram LT-8)	1秒
耳内温	耳栓型センサー (LT-ST08-13)	1秒
体重	精密体重計 (A&D GP100-K)	適宜
ストレス	自覚症状しらべ	適宜

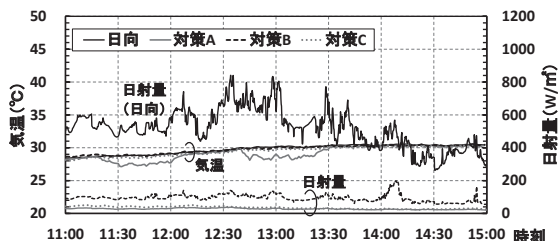


図-3 実験期間中の平均気温と平均日射量の経時変化

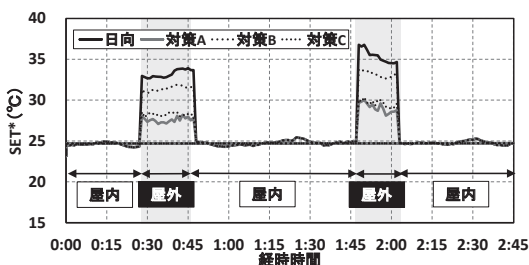


図-4 実験期間中の平均SET*の経時変化

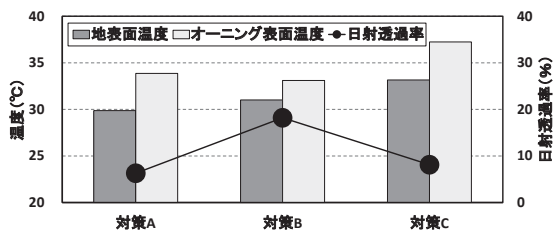


図-5 平均表面温度と日射透過率

量や赤外放射量の差となり、対策AとCには平均放射温度MRTでは約2℃の差が生じており、SET*の差が生じた要因と推察される。さらに、対策Bは放射環境では対策Aとほぼ同等であるが、周囲を親水性不織布で囲っているため、実験中の平均風速が対策A、Cで0.8m/s程度に対して、対策Bでは0.2m/sと小さく、風通しが悪いことが他の対策空間に比べてSET*が高くなる要因として挙げられる。さらに、対策Aは微細ミスト噴霧による気温低減効果も加わることで、SET*が最も低い環境が形成されていた。

2. 2 人体心理・生理反応

人体心理反応の結果として、SET*と温冷感・快適感の関係を図-6に示す。温冷感は、SET*が上昇すると「暑い」側の申告が増え、SET*が下降すると「寒い」側の申告が増える正の相関の傾向が見られる。一方で、快適感にはSET*が上昇すると「不快」側の申告、SET*が下降すると「快適」側の申告が増える負の相関の傾向が見られた。さらに、SET*が30℃以上になると快適感の申告でばらつきが目立つ傾向となった。なお、空調している屋内においても「暑い」「不快」との申告が見られる理由として、回答時に屋外実験時の履歴が残った状態であったことが推察される。

人体生理反応の結果として、SET*と心拍上昇量・平均皮膚温度上昇量の関係を図-7に示す。平均皮膚温度は、7点から皮膚温度の測定値から部位ごとに重み付けをして算出した(Hardy 1938)。また、上昇量は、実験開始後最初の屋内着座の最後10分間における心拍数・体表面温度の安定値を基準として、屋外着座時の着座後15分間における上昇量として算出した。SET*が上昇すると心拍数や平均皮膚温度上昇量が上昇する傾向がみられる。心拍数は個人差がありばらつきが見られたが、平均皮膚温度上昇量はSET*との関係が良好であった。

各対策空間の屋外着座時における15分間の心拍上昇量と平均皮膚温度上昇量の平均した値を図-8に示す。心拍上昇量と平均体表面温度上昇量は、日向と比べて対策A, B, Cに有意差が見られた。この結果は屋外に設置した暑熱対策技術によって暑熱環境緩和効果が見られ、人の受ける生理的影響の上昇を抑制し、熱ストレスの上昇の緩和に効果があったものと推測される。

2. 4 作業効率

実験日、空間別の正答率変化について図-9に示す。番号は実験日を示している。正答率については、最初の屋内作業時の点数を被験者別にそれぞれ基準とし、その後行った屋外作業時の点数の増減率を正答率変化とした。全体的に正答率は屋内作業に比べ屋外作業は減少傾向にあったが、暑熱対策空間に関する作業効率の関係を確認することはできなかった。

2. 5 人体熱収支

人体熱収支の算出方法を図-10に示す。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の3つを考慮し、蓄熱量Sを求める。本実験では、着座する椅子の座面に断熱材を添付することで、伝導による熱移動は無視することとした。各熱収支項については三坂ら(2017b)に従い、温熱環境と人体生理反応の測定値を用いて算出した。なお、放熱量C・R・Eは正が放熱、負が受熱とし、蓄熱量Sは正が蓄熱、負が放熱と表現する。

被験者別の受放熱量を正の値が受熱、負の値が放熱とし

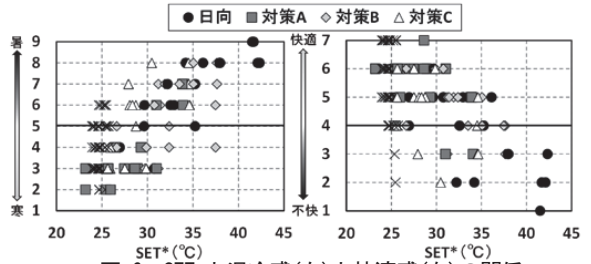


図-6 SET*と温冷感(左)と快適感(右)の関係

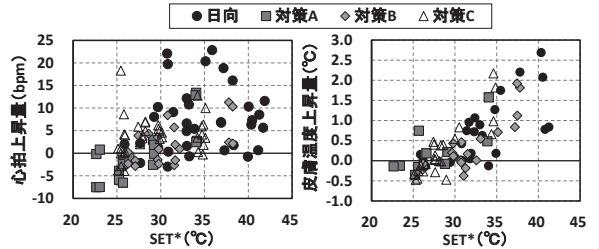


図-7 SET*と心拍上昇量(左)と皮膚温度上昇量(右)の関係

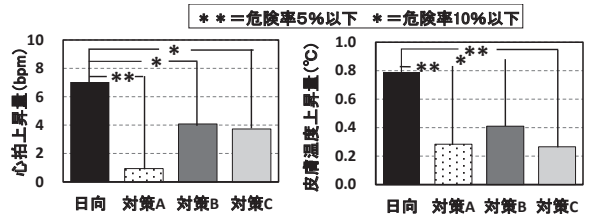


図-8 心拍上昇量(左)と皮膚温度上昇量(右)の平均値

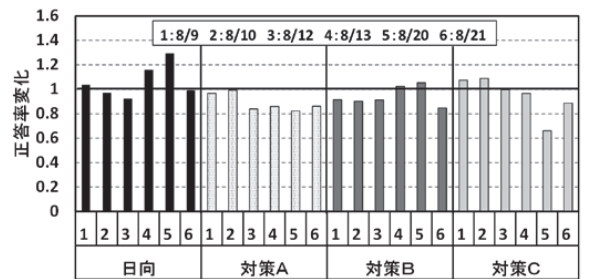


図-9 実験日別の正答率変化

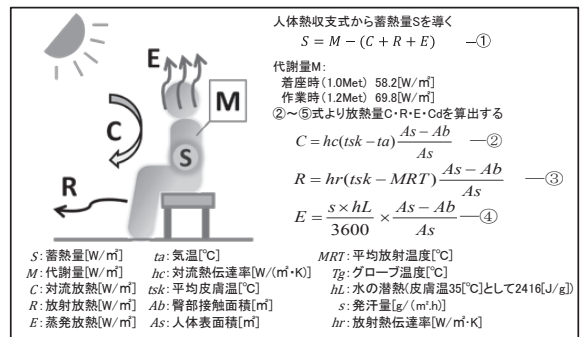


図-10 人体熱収支の算出方法

て図-11 に示す。対流放熱量は、日射等によって皮膚温度が上昇し、放熱量が上昇したものと考えられる。日向、対策 A、C は風が通りやすく放熱量が大きく上昇しているが、対策 B は風が弱いいため、他の暑熱対策空間に比べ放熱量が小さくなっている。一部の被験者で対流放熱が受熱となっているのは、皮膚温度より気温のほうが高い実験日であったためと考えられる。放射放熱量は、日向の放射熱の受熱が大きく、それに比べて、各対策空間は暑熱対策技術によって大幅に受熱を抑えていた。蒸発放熱量の結果より、各対策空間の日射量が図5 の日射透過率で日向の8~28%程度と小さくなっていることから、日射を遮蔽することで発汗を大幅に抑制することができるものと考えられる。

被験者別の蓄熱量の算出結果を図-12 に示す。日向が他の対策に比べ、蓄熱量が大きかった。また、対策 A、B、C においては蓄熱量に大きな差が見られず、各対策空間において温熱環境の差は小さいと考えられる。

蓄熱量、放射放熱の平均値を図-13 に示す。蓄熱量は日向と対策 A、B、C において約2倍の差が生じ、放射放熱においては日向と対策 A、B、C で約3倍の差が生じた。蓄熱量、放射放熱ともに日向と対策 A、B、C において危険率1%以下で有意差がみられた。今回の実験は蓄熱量の低減には放射放熱の寄与が大きいことが推察される。対策 A、B、C の暑熱対策技術は、放射環境の改善により効果的であると考えられる。

3. 考察

ここでは、屋外における空間利用の違いに着目し、着座時と作業時における温熱環境と人体生理・心理反応の関係について考察を行う。

空間利用の違いによる人体生理反応と温熱環境の関係について、図-14 に心拍上昇量と SET*、図-15 に皮膚温度と SET* の関係を示す。SET* の上昇とともに心拍・皮膚温度とも上昇量が大きくなる傾向がみられるが、皮膚温度の方がやや高い相関となった。いずれにおいても、着座時と作業時において顕著な差は見られなかった。さらに、耳内温度上昇量においても同様の傾向となった。今回の実験では、空間利用の違いに伴い人体生理反応が異なる傾向を確認することができなかった。

図-16 に温冷感と心拍上昇量の関係を示す。着座時に比べて、作業時は着座時に比べてばらつきが大きく、作業時は心理申告と心拍上昇量の関係に個人差が出やすいことが推察される。図-17 に温冷感と皮膚温度上昇量の関係を示す。皮膚温度が上昇すると「暑い」と申告し、皮膚温度が下降すると「寒い」と申告する傾向にあった。温冷感の中立の申告をした時の皮膚温度上昇量は、着座時、作業時

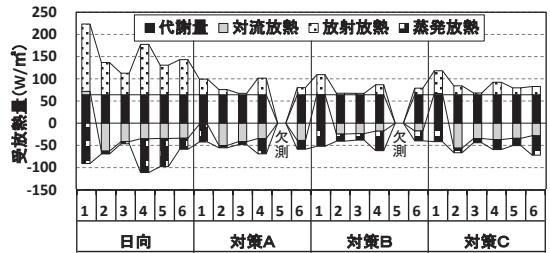


図-11 被験者別熱収支各項の内訳

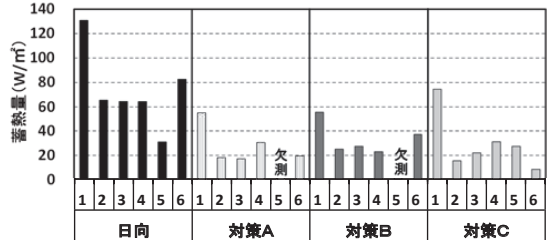


図-12 被験者別蓄熱量の算出結果

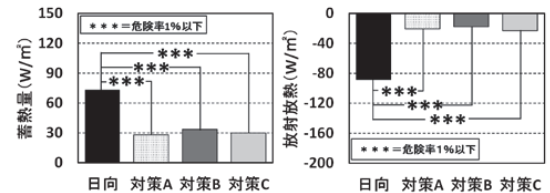


図-13 蓄熱量(左)と放射放熱量(右)の t 検定結果

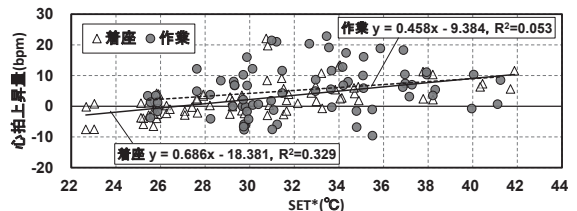


図-14 心拍上昇量と SET* の関係

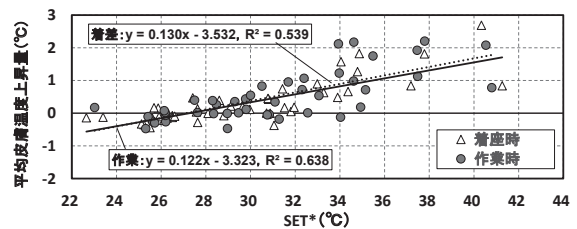


図-15 皮膚温度上昇量と SET* の関係

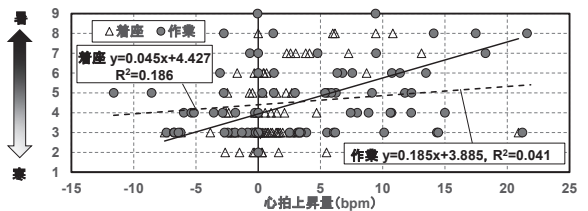


図-16 心拍上昇量と温冷感の関係

で大きな差は見られなかった。一方で、回帰直線の傾きは心拍上昇量、皮膚温度上昇量ともに作業時の方が小さく、着座時と比べて作業時の方が生理変化に気づきにくい傾向となり、温熱環境の変化による人体生理反応の変化に対する感覚が鈍ることを意味すると考えられる。

図-18には、空間利用別の蓄熱量とSET*の関係を示す。同じSET*となる温熱環境下でも、空間利用が異なることで15分間の滞在での人体への蓄熱量に違いが生じており、熱ストレスに違いが生じる可能性が考えられる。

以上の結果から、温熱環境と人体生理反応の関係で、蓄熱量以外では着座時と作業時の顕著な差は見られなかった。しかしながら、人体生理と心理反応の關係に着目すると、熱ストレスを受けた状態では、着座時に比べ作業時の温冷感申告の変化は小さくなり、作業時には生理変化に対する感覚が低下していることが推察される。このことは、空間利用が異なることで、熱ストレスによる影響を考慮した温熱環境の推奨値に違いがあることを示唆しているものと考えられる。しかしながら、今回の実験値にはばらつきが多いことから、より多くの精度の高いデータの収集を進めていくことが必要であると考えられる。

おわりに

屋外空間を利用する際に適した温熱環境条件を抽出する手法を確立することを目的として、温熱環境と人の生理・心理反応、作業効率に関する実験を行った。

暑熱対策により、温熱環境、人体心理反応、人体生理反応、人体熱収支の項目において暑熱環境対策による効果が見られ、暑熱環境下の日向と比べて有意な差を確認できた。暑熱環境対策による作業効率の向上を確認することができなかったが、作業時は着座時に比べて作業に集中することが想定され、温熱環境や人体生理に変化が生じた状態でも感覚が低下する傾向となり、熱ストレスの観点から危険となる可能性が推測された。このことは、空間利用が異なることで、人体生理・心理反応の面から推奨される温熱環境には、違いがある可能性を示唆している。

今後の課題として、より多くの実験データを収集し、精度を向上させていくことで、温熱環境推奨値の導出方法を検討することが必要であると考えられる。

謝辞

本研究は、科学研究費・基盤研究(C)「快適な屋外空間創出のための温熱環境設計条件の抽出と設計手法の確立」(代表・三坂育正 16K06617)により実施した。また、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ものである。

引用文献

安藤翔明・三坂育正・野崎尚子・小林昭彦・竹野淳一(2011)人が利用する

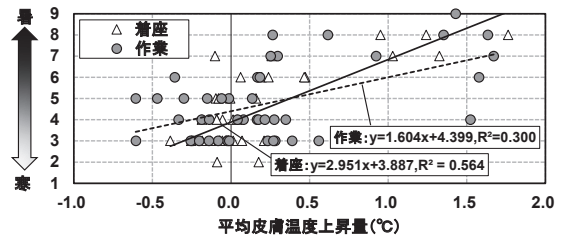


図-17 温冷感と平均皮膚温度上昇量の関係

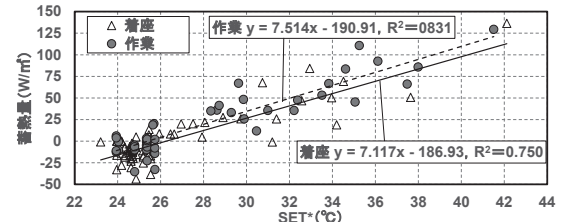


図-18 蓄熱量とSET*の関係

屋外空間における環境評価に関する研究 その1 屋外オフィスにおける日除けを対象とした温熱環境評価。日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.815-816

安藤翔明・西田恵・三坂育正・成田健一(2012) 大丸有地区の屋外アメニティ空間における温熱環境と利用状況の調査。アーバンインフラテクノロジー推進会議第23回技術研究発表会発表論文集(WEB)

藤原邦彦・嘉名光市・高木希望・野崎尚子(2016) オフィスビル公開空地に設置された“屋外ワークスペース”の利用実態と温熱環境。日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.884-885

環境省(2012) ヒートアイランド対策マニュアル〜最新状況と適応策等の対策普及に向けて〜。

Hardy, J.D. and E.F. Dubois (1938) The technique of measuring radiation and convection, *J. Nyrz*, 15(5), pp.461-475

三坂育正・松林康子・斉藤石也・大石裕一・岸野英樹・石丸泰・堀口恭代(2016) 親水性を有する不織布を用いたテントユニットによる暑熱環境緩和に関する研究。環境情報科学 学術研究論文集, No.30, pp.31-36

三坂育正・石丸泰・堀口恭代・成田健一(2017a) 暑熱環境対策下における人の空間利用に関する研究。環境情報科学 学術研究論文集 31, pp.131-136,

三坂育正・成田健一・石丸泰・堀口恭代(2017b) 水冷式ベンチの暑熱環境緩和効果の評価に関する研究。人間・生活環境系学会大会 第41回人間・生活環境系シンポジウム, pp.139-142

中野淳太(2016) 利用者の温熱環境適応を考慮した駅構内温熱環境の改善。日本建築学会, 第40回熱シンポジウム「ハイオクライマテックデザインの視点から地域・都市・建築の環境を考える」資料, pp.101-106

日本建築学会(2014) 温熱生理・心理測定基準・同解説。日本建築学会環境基準 ALJED-H0001-2014

酒井一博(2002) 日本産業衛生学会産業疲労研究会撰「自覚症しらべ」の改訂作業 2002。労働の科学, 57(5), pp.295-298

Tsuzuki Kazuyo・Misaka Ikusei・Narita Kenichi・Ishimaru Yasushi(2016) Effects of solar heat load on the thermoregulatory responses of young and older men. *Indoor Air* 2016