

令和元年5月31日現在

機関番号：32407

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06617

研究課題名(和文) 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

研究課題名(英文) Extraction of thermal environment condition and establishment of design method for comfort outdoor space

研究代表者

三坂 育正 (Misaka, Ikusei)

日本工業大学・建築学部・教授

研究者番号：30416622

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：屋外空間利用時における温熱環境条件の確立を目的とし、温熱環境と人の生理・心理指標、作業効率に関する複数の実験を行った。実験結果から、利用目的に応じて温熱環境条件に違いが生じることが明らかとなり、屋外空間の温熱環境設計手法の可能性を示唆できた。また、軽作業を行う屋外空間の温熱環境の推奨値を、作業効率向上の観点から検討した。正答数達成度とSET*の関係から温熱環境推奨値を設定し、心理面や熱ストレス面の影響から妥当性について評価を行った。屋外空間の温熱環境の設計条件を検討する上では、作業効率や人体生理・心理反応、熱ストレス等も考慮し、多面的な評価により推奨値の抽出が可能になると考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、夏季の温熱快適性を向上させ、積極的な屋外空間の活用を促進することを目的として、屋外空間の活用方法や特徴を考慮した温熱環境の設計目標値(許容値や推奨値)を設定する点に、独創的な点がある。今回の研究結果から、利用目的に応じて温熱環境の目標値に違いが生じることを明らかにした。また、目標値(推奨値)の抽出においては、屋外空間を活用するためのメリットとリスクの両面からの評価から、推奨値の妥当性の評価する方法も提示した。このことは、屋外空間の設計において根拠に基づく指標を用いた新たな手法を提案するもので、暑熱環境下における屋外空間のさらなる活用に向けて、社会的意義は大きいものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：Several 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. 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. We examined the method of extracting the recommended condition of the thermal environment from the viewpoint of work efficiency when using the outdoor space as a space for performing light work. The validity was evaluated based on the psychological and human heat stress. Considering the thermal environment conditions in the outdoor space, it is considered possible to extract recommended values by multifaceted evaluation, taking into consideration work efficiency, human body physiology / psychological response, heat stress and so on.

研究分野：建築環境工学

キーワード：暑熱環境 空間利用 人体生理・心理反応 作業効率 設計目標値

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

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いる。高温化に伴う都市生活への影響として、特に健康影響への影響、具体的には人の熱ストレス増大の影響は大きく、熱中症で搬送される患者数が急増している。また、夜間の熱帯夜日数も増えており、睡眠阻害・不眠症などによるストレス増加が懸念され、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。2020年夏季に開催されるオリンピック・パラリンピック東京大会においても、大会に出場するアスリートや観客に対する暑さ対策が懸念されており、適応策の推進が必要であると考えられる。

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と考える。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、屋外の利用目的に応じた空間の設計手法が十分に確立されているとは言えない。住宅や事務所建築における屋内空間の設計においては、気温の設定値(例えば28など)を設けて、その条件を満たすためのパッシブな手法や空調設備の設計が行われている。近年では、通風用のファンや放射冷暖房などを用いて、気温だけでなく、温熱快適性指標 SET*を用いてASHRAEの快適範囲を満たすような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を進めていくことが必要である。

2. 研究の目的

ヒートアイランド対策の推進において、都市生活者の熱ストレスの低減を目的とした「適応策」が推進されているが、より快適な空間を創出することができれば、夏季の日中においても都市の屋外空間を人が積極的に活用することが可能となる。そのためには、これまで屋内空間において実施されてきた、気温の設定値や温熱環境の快適範囲を満たすような設計と同様の考え方で、屋外空間を設計していく手法を確立する必要がある。

そこで、本研究は、屋外空間を対象として、利用状況や人の生理・心理状況の実験を行うことで、利用目的に応じた温熱環境の目標値を導き出すことを目的とする。最終的には、屋外空間の利用目的に応じた温熱環境の目標値を満足するための設計・評価する手法を提案することで、より快適な空間の創出の促進を図ることが本研究の目的である。屋外空間の利用目的と温熱環境の目標値に関する概念図を図-1に示す。

本研究で実施する実験では、異なる温熱環境を持つ空間において、人体の生理・心理指標の計測や作業効率の評価を行う。その結果から、人の熱ストレスを考慮した空間の温熱環境として、利用目的に応じて許容できる、あるいは推奨される値を導き出す手法が可能になると考えられ、最適な温熱環境を有する屋外空間の設計手法の確立に繋がるものと期待できる。

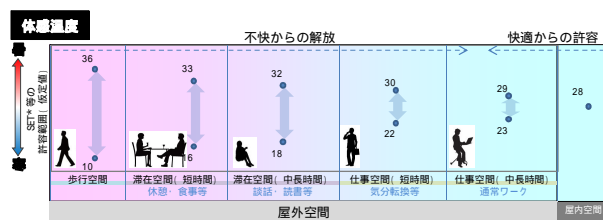


図-1 屋外空間の利用目的と温熱環境目標値のイメージ

3. 研究の方法

本研究は、3つの段階・方法により実施した。それぞれについて、以下で述べる。

(1) 屋外空間の空間利用の違いが人体生理・心理反応、作業効率に及ぼす影響に関する実験
異なる温熱環境を持つ空間を対象として、温熱環境が人体の生理・心理反応や作業効率に与える影響を明らかにすることを目的とし、利用用途に適した屋外空間の温熱環境条件に違いが生じる可能性を確認する目的で実験を行った。

実験は、埼玉県宮代町の大学キャンパス内で、2016年8月に実施した。暑熱対策の有無による温熱環境や、作業内容の違いによる人体生理・心理反応および作業効率に関して、被験者実験を行った。被験者実験では、被験者は男性6名女性2名として、1人の被験者につき1日2回で、計4日間の実験を実施した。1回の実験の流れを図-2に示す。屋外に暑熱対策空間(以下、対策空間)と、対策を施さない日向空間の2パターンを設置し、それぞれの温熱環境下に被験者を一定時間滞在させた。屋外滞在時は、着座(安静)条件で2日、着座(作業)として着座状態で読書(ニュース記事を読む作業)を2日間実施した。

測定項目は、温熱環境、人体生理・心理反応とした。温熱環境は、温熱環境4要素について測定

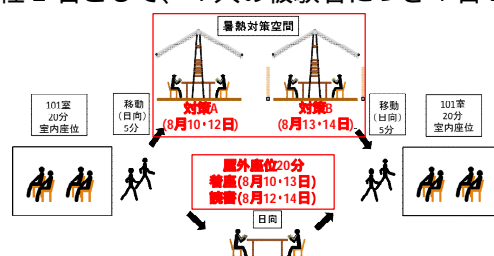


図-2 実験概要 [研究方法(1)]

し、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(体重変化量)を測定した。人体心理反応に関しては、日本建築学会規準に従い、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、ストレス指標として唾液アミラーゼ反応についても測定を行った。また、読書条件時においては、記事内容の理解度を5段階評価の申告を行い、理解状況に関する評価を試みた。

実測で得られたデータから、着座安静時と読書条件の空間利用の違いが人体生理・心理反応、作業効率に及ぼす影響に関して解析を行い、温熱環境条件の必要性に関する評価を行う。

(2) 暑熱環境下における空間利用の違いによる人体生理・心理反応の評価実験

本実験は、暑熱環境下において、空間利用の違いが、人体の生理・心理反応に及ぼす影響について評価することを目的として行った。

実験は、日本工業大学宮代キャンパス内で、被験者による日向・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として実施した。被験者は、20歳前後の健康な男性とし、気温28℃設定の室内空間に滞在後、3種類(レベル)の対策空間と日向に分かれ、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。実験は、2017年8月に6日間実施し、被験者は暑熱対策空間を日ごとに変更し実施した。屋内・屋外の着座時間は20分、1日の実験で1人の被験者が同一の屋外空間で、最初の屋外着座時では着座のみ、2回目では作業とした。1日の実験の流れを表-1に示す。

温熱環境や人体生理反応に関する測定項目や方法、ならびに人体心理反応における調査項目や方法については、(1)の実験とほぼ同様とした。被験者が実施する作業は四則演算とし、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した。

本実験で得られる異なる温熱環境で着座安静および作業時におけるデータから、暑熱環境下における空間利用の違いに伴う人体生理・心理反応や作業効率に関して、温熱環境との関係について解析し、最適な温熱環境設計条件の抽出に向けた評価を行う。

表-1 実験スケジュール [研究方法(2)]

	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 対策A着座 対策B着座 対策C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 対策A作業 対策B作業 対策C作業	移動 + 体重測定	屋内着座	

(3) 屋外における作業効率に着目した温熱環境条件の抽出法検討のための実験

本実験では、屋外空間における15分間の軽作業時における、作業効率の面から空間利用における最適な温熱環境の設計する手法の妥当性を評価する目的として実施した。

実験は、2018年8月に(1)~(2)と同様に被験者実験として3日間実施し、日向と対策空間を対象として、温熱環境や作業効率、人体生理・心理反応等に関する測定を行った。屋外の実験条件について、図-3に示す。温熱環境や人体生理反応に関する測定項目や方法、ならびに人体心理反応における調査項目や方法については、(1)の実験とほぼ同様とした。

作業効率に関する実験は、(2)と同様に四則演算とし、各実験日の1回目の正答数の平均を基準とし、屋外空間での正答数との比を正答数達成度と定め指標とした。

本実験では、四則演算の正答数達成度を指標として、達成度が室内よりも高くなる状態を作業効率の向上ととらえ、その温熱環境を屋外環境における設計条件と想定した場合に、人体生理や心理反応の面からその妥当性について検討し、設計手法について評価することとした。

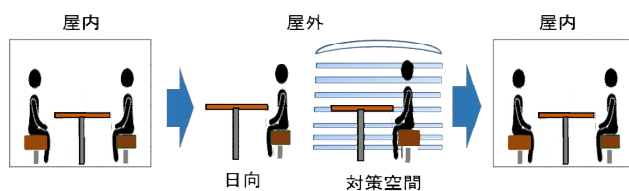


図-3 実験概要 [研究方法(3)]

4. 研究成果

(1) 屋外空間の空間利用の違いが人体生理・心理反応、作業効率に及ぼす影響に関する実験

実験において、被験者が滞在する空間は、温熱快適性指標 SET*で約4~7日向に比べて対策空間が低く維持されており、この温熱環境の違いが人体生理・心理反応や読書時における作業効率に及ぼす影響の評価を試みた。

温熱環境と人体心理反応の関係について、温冷感、快適感とSET*の関係(図-4)では、温冷感では正の相関、快適感では負の相関がみられ、対策空間は屋外に比べてSET*が低いことで、「快適」「涼しい」の申告が多い傾向にある。また、空間利用の違いに関しては、読書時に「暑い」「不快」の申告が多い傾向も見られるが、明確な差ではなかった。

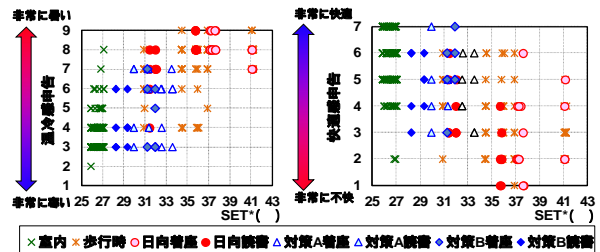


図-4 SET*と温冷感・快適感申告の関係

温熱環境と人体生理反応の関係では、SET*が上昇すると、心拍上昇量が大きくなる傾向が確認でき、読書時の方が着座時に比べてSET*上昇による心拍上昇量の増加量が大きく、暑さに対して生理反応の感度が高くなると推察される。また、唾液アミラーゼ活性とSET*の関係(図-5)では、読書時の方がストレス値の上昇傾向が見られ、SET*が高くなると唾液アミラーゼ活性も上昇する傾向が見られ、やはり読書時の方が暑さに対して感度が高い傾向を確認できた。

読書による作業効率の評価指標として、記事の理解状況の指標を理解指数 Iu (Index of Understand) として設定した。理解指数 Iu は、記事の理解度を表す指数と位置づけ、各記事の難度に対する重み付け Wi を設定し、被験者の理解度の申告 Ui に重み係数 Wi を乗じた値として算出した。個人別の理解指数差と SET* 差の関係に着目した結果(図-6)から、SET* 差が大きくなると理解指数差が上昇する傾向が見られ、暑熱対策により、読書という作業での理解度が向上し、作業効率の向上が期待できる。

本実験では、対策空間と日向による温熱環境の人体生理・心理反応ならびに作業効率に関する実験を行い、人体の生理・心理や作業効率の結果から、空間利用の違いにより適した温熱環境条件が異なる可能性を確認することができた。屋外空間においては、利用目的に応じた暑熱環境対策の設計条件が必要であることを示唆することができた。

(2) 暑熱環境下における空間利用の違いによる人体生理・心理反応の評価実験

(1)の実験において、空間利用の違いから、適した温熱環境条件となる値が存在する可能性を見出せたことを受けて、空間利用の違いが人体の生理・心理反応に及ぼす影響の特性を明らかにすることを目的として実験を行った。

温熱環境は、対策空間はSET*が日向に比べて3~7 程度低く、対策空間によりその差が異なることが確認できた。温熱環境と人体生理・心理反応の関係では、(1)の結果と同様の傾向を確認することができた。また、人体生理反応に関して、熱ストレスの指標として、人体への蓄熱量を算出し評価を行った。人体蓄熱量は日向と対策空間では約2倍の差が生じており、熱収支項目における放射放熱での差が大きく、蓄熱量の低減に放射放熱の寄与が大きいことが推察できた。作業効率に関しては、実験日、空間別の正答率変化について検討を行ったが、今回の実験では、暑熱環境対策と作業効率の関係の明確な関係について確認することはできなかった。

空間利用と人体生理・心理反応の関係に着目して解析を行った。図-7にSET*と人体蓄熱量の関係を示す。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分間滞在時の蓄熱量に違いが生じ、熱ストレスに違いが生じる可能性が考えられる。温冷感と心拍上昇量の関係(図-8)では、作業時は着座時に比べてばらつきが大きく、作業時には個人差が出やすいことが推察される。温冷感と皮膚温度上昇量(図-9)の関係では、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」と申告する傾向にみられ、温冷感が中立申告時の皮膚温度上昇量は、着座時、作業時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なる傾向が確認できる。このことは、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度が鈍いことを意味すると考えられる。

以上の結果から、温熱環境と人体生理反応の関係では、人体への蓄熱などの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、作業時には生理変化に対する感度が低下す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。温熱環境の推奨値を設定する際には、作業効率や熱ストレス等の生理反応、さらに心理反応への影響など、多様な側面からの評価が必要であることが確認された。

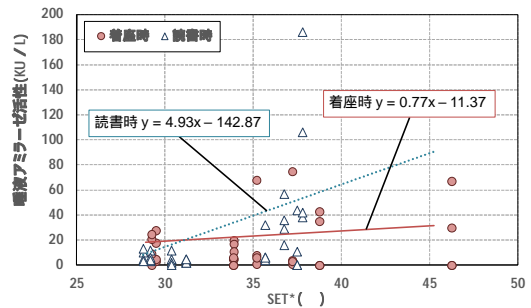


図-5 SET*と唾液アミラーゼ活性の関係

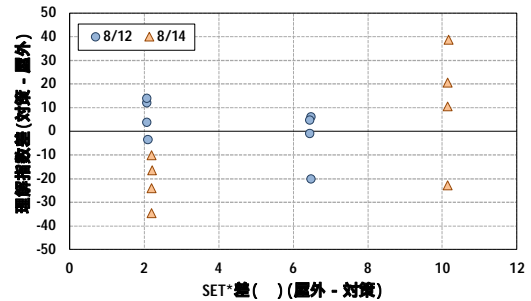


図-6 SET*差と理解度指数差の関係

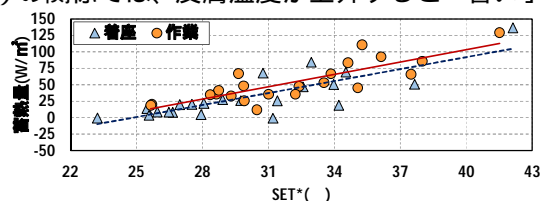


図-7 SET*と人体蓄熱量

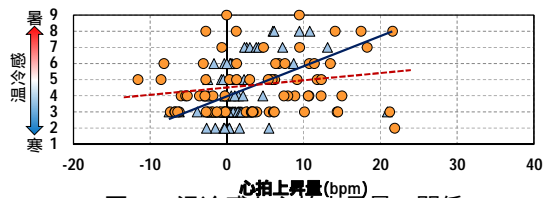


図-8 温冷感と心拍上昇量の関係

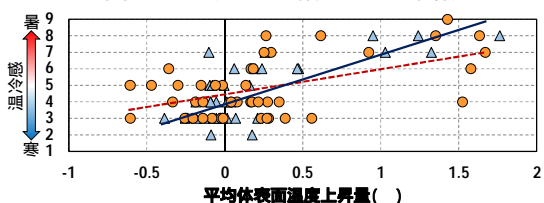


図-9 温冷感と皮膚温度上昇量の関係

(3)屋外における作業効率に着目した温熱環境条件の抽出法検討のための実験

これまでの実験で、空間利用の違いから、適した温熱環境条件となる値が存在する可能性を見出し、条件を検討する上では、多様な側面からの評価の重要性が示された。そこで、本実験では、屋外軽作業時における作業効率に着目した温熱環境条件の検討を目的として実施した。

実験を実施した期間は、猛暑となり、温熱環境条件としては厳しい状況ではあったが、対策空間と日向ではSET*で7程度の差が生じており、その空間を対象として実験・解析を行った。

今回の実験では、作業効率の指標として、正答数達成度を用いた。各実験日の1回目の正答数の平均をそれぞれの被験者の基準とし、各回の正答数の比を正答数達成度として算出した。正答数達成度は、基準に比べて日向では減少傾向にあり、対策空間では増大傾向が見られた。このことから、暑熱対策技術による作業効率に対して、一定の効果を確認することが出来た。屋外空間作業時における正答数達成度とSET*の関係を図-10に示す。SET*が上昇するにつれて正答数達成度が減少する、負の相関が見られた。ばらつきが大きいものの、回帰式を見るとSET*が1上昇するにつれて正答数達成度が2.4%減少する傾向となった。

正答数達成度が100%を超えた場合に屋内時での作業能力が維持されていると考え、相関がみられたSET*と正答数達成度の関係から、正答数達成度が100%となるSET*=32.64を、今回の作業を行う空間の温熱環境の推奨値と設定した。以降では、この推奨値の環境下での、人体心理・生理反応への影響について考察することとした。

推奨値と人体心理反応の関係について検討する。図-11にSET*と温冷感の関係を示す。SET*が上昇するにつれて温冷感は「暑い」側の申告が増える正の相関が見られ、SET*が1上昇すると温冷感は約0.71上昇する傾向となっている。なお、温熱環境推奨値における温冷感は6.5であり、「暖かい」程度の申告となる。同様の手法で、快適感、満足感、許容度について解析を進めた結果、人体心理反応の面から温熱環境の推奨値を評価すると、温冷感では「やや暖かい」と感じているが、快適感や満足感では「やや不快・不満」側ではあるものの中立に近く許容できる申告となっている。今回の推奨値は、作業空間として許容できる温熱環境の上限値に相当すると考えられる。

人体生理反応に関しても同様の解析を行った。SET*と体表面温度上昇量の関係では、SET*が1上昇すると体表面温度が約0.15上昇する正の相関が見られ、推奨値であるSET*=32.64のとき体表面温度上昇量は1.45であった。SET*と蓄熱量の関係(図-12)から、SET*が上昇するにつれて蓄熱量が上昇する正の相関があり、推奨値における蓄熱量は39.25W/m²となり、熱ストレスを受けることが想定される。なお、蓄熱量が0W/m²のときのSET*は26.5で、空調された室内空間がこれに相当すると考えられる。

表-2に推奨値と温冷感、快適感、満足感、許容度、体表面温度上昇量、蓄熱量の関係をまとめたものを示す。この結果から、生理的に多少の熱ストレスを受けている状態においても、心理的な評価が中立に近ければ作業効率が維持できることが推察される。しかしながら、この状態の暑熱環境下において熱ストレスを受けているため、必ずしも安全な状態とは言いきれず、より詳細に生理学的な評価を進める必要があると考えられる。

以上の結果から、屋外空間の温熱環境の設計手法を検討する上では、作業効率を重視してSET*、などの温熱環境条件を定めた場合でも、人体生理・心理反応や人体熱収支といった要素を考慮することが重要であると考えられ、そのような多様な側面から評価することで、温熱環境の推奨値を抽出することが可能になるものと考えられる。

(4)研究成果のまとめ

屋外空間の利用目的に応じた温熱環境条件の抽出を目的として、暑熱対策空間と日向空間による温熱環境の人体生理・心理反応ならびに作業効率に関する実験を行った。屋外作業時における作業効率や人体の生理・心理反応から、利用目的に応じた温熱環境条件には違いが生じることを明らかにし、暑熱環境対策の設計手法の可能性を示唆することができた。また、屋外空間で作業を行う場合の特性として、作業に集中す

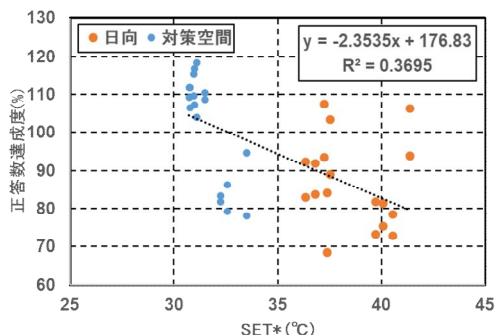


図-10 SET*と正答数達成度の関係

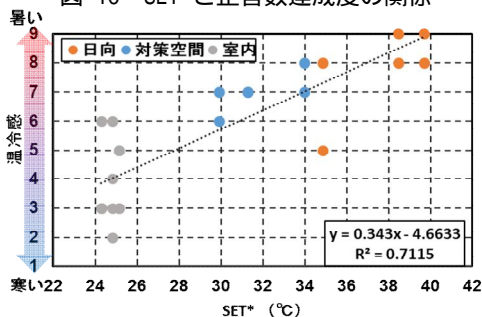


図-11 SET*と温冷感申告の関係

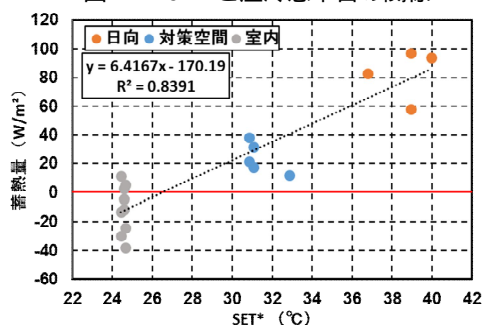


図-12 SET*と人体蓄熱量の関係

表-2 温熱環境推奨値における各要素の値

SET*=32.64 のとき	
温冷感	6.5:暖かい程度
快適感	3.5:中立よりやや不快
満足感	2.3:中立よりやや不満足
許容度	2.7:中立よりやや許容できる
体表面温度上昇量(°C)	1.45
蓄熱量(W/m ²)	39.25W/m ²

ることで生理反応に対する感度が低下する懸念が生じ、人体生理や熱ストレスの状態等、多様な側での影響を考慮して温熱環境条件を検討する必要があることが明らかとなった。

以上の結果をもとに、屋外空間を15分間の軽作業(単純計算)を行う空間として使用する場合の温熱環境の推奨値を作業効率の観点から抽出する方法について検討を行った。作業効率の指標として正答数達成度、温熱環境の指標をSET*とし、正答数達成度が室内時と同等になる温熱環境を推奨値として設定した。この設定した推奨値に関して、心理面や熱ストレス面の影響について解析を行うことで、温熱環境の妥当性についての評価を行った。

以上の様に、屋外空間の温熱環境に関する設計条件を検討する上では、作業効率からSET*などの温熱環境推奨値を定めたとしても、人体生理・心理反応や人体熱収支といった部分も考慮して妥当性を検証することが重要であり、そのような多様な側面から評価することで、温熱環境の推奨値を抽出することが可能になるものと考えられる。

(5)今後の課題

屋外空間の利用用途に応じた温熱環境条件を抽出していくために、今後の課題として以下を挙げることができる。

- ・軽作業のみならず、様々な用途に関する実験を重ね、より多くの実験データを収集して精度を向上させていくことで、温熱環境推奨値の抽出方法を確認していくことが必要である。
- ・個人や環境条件に多くのばらつきが生じるため、推奨値として挙げる数値の幅に検討していく必要がある。その際、実際の空間利用者の特性に応じて推奨値が変わる可能性について考慮することが重要であり、空間特性に応じて対象を想定し、推奨値を検討する必要がある。
- ・屋外空間を活用する場合に、人体生理指標、特に熱中症予防の観点から熱ストレスとしての許容できる値について生理学的な検討を重ね、推奨値の妥当性を判断する必要がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

三坂育正、成田健一：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、環境情報科学学術研究論文集、査読有、Vol.32、pp.119-124、2018年
https://doi.org/10.11492/ceispapers.ceis32.0_119

〔学会発表〕(計3件)

三坂育正、成田健一：微細ミスト噴霧による人体表面での蒸発冷却効果に関する研究、第42回人間-生活環境系シンポジウム、2018年
三坂育正、成田健一、蝦名聖二：暑熱環境下における空間利用に関する研究、日本ヒートアイランド学会第12回全国大会、2017年
三坂育正、成田健一、石丸泰、堀口恭代：暑熱環境に適應する対策技術の人体生理・心理反応による評価、日本気象学会2017年度秋季大会、2017年

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)
取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等：無し

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：成田 健一
ローマ字氏名：(NARITA, Ken-ichi)
所属研究機関名：日本工業大学
部局名：建築学部
職名：教授
研究者番号(8桁)：20189210

(2) 研究協力者

無し

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。