

温熱快適性を考慮した建築外部空間の環境設計

Environmental Design of Building Outer Space Considering Thermal Comfort

大阪府立大学大学院 工学研究科 機械工学分野
Dept. Mechanical Engineering, Osaka Prefecture University

吉田篤正
Atsumasa YOSHIDA

キーワード：熱環境 (Thermal Environment), 屋外空間 (Outer Space), 温冷感 (Thermal Sensation), 熱負荷 (Thermal Load), 適応策 (Adaptation)

1. はじめに

近年の都市域における熱環境の悪化は滞在する人間に不快感を与えるだけでなく、熱中症を引き起こすことがあり大きな懸案事項となっている。屋内環境においては空調を導入することで熱環境の改善は望めるが、屋外においては表面被覆材の改変や既存建築物の形状の変更は容易ではなく、予め熱環境を評価する必要がある。そういった評価を行うに当たっては温冷感を示す指標が必要である。

人体の熱収支から得られる熱負荷量を人体熱負荷量[1]と定義し、これを用いて人体温冷感の予測を行うことの妥当性を示す。屋外でふく射環境が異なるエリアを対象に温熱環境に与える影響について検討する。屋外環境における温熱快適性を評価する上で空間の移動や天候の変化に伴う非定常性は無視できない。特に人体へのふく射量の変化、人体の代謝量の変化は屋内で想定される変化量よりも大きい。非定常温冷感の予測についても言及する。

2. 温冷感指標

人間は温度や気流など環境要因を区別して暑い寒いと感じるのではなく、複合して感じている。加えて人間側の運動状態や行動履歴によって等しい環境条件でも異なった感覚を生じる。一般に、人体の熱的快適感に影響を与える要素として、環境条件である空気温度、放射温度、湿度、気流と人間側の要素である着衣量、代謝量の合計 6 要素によって人体の温熱快適性は支配されているとされている。そこで、まずこれらの要素について見ていく。

空気温度は一般に言われる気温であり、上下・水平に温度分布がある場合、どこで空気温度を定義するのは難しい。人体の姿勢などによってどの高さの空気温度をとるかが異なってくる。平均放射温度 MRT (Mean Radiant Temperature) とは、実際の種々の放射場においてそこに滞在する人が周囲環境とふく射熱交換を行う場合の仮想的な均一の周囲温度である。湿度は相対湿度あるいは絶対湿度で表される。湿度は温冷感に影響を与えると共に、高温下では湿度の大きさによって温熱快適性が大きく異なってくる。気流とは空気の動きのことである。人体が動いている場合は、その動きも含めた相対気流として考える。気流は、体感に与える影響が大きく、特に屋外環境においては、夏季の涼感、冬季の寒さに対して大きく影響を及ぼす。衣服の断熱性はクロ (clo) という単位で表される。温熱環境評価指標に用いられる clo 値は皮膚表面から着衣外面までの熱抵抗である。人間が生理的、心理的に快適さを維持できる被覆の断熱性能として定義されていて、1clo は、 $0.155 \text{ m}^2\text{C/W}$ の抵抗値である。人体は筋肉の運動などによって熱を発生している。この生体活動を代謝といい、代謝による単位体表面積あたりの発熱量を代謝量という。人体の代謝量は、メット (met) という単位で表される。1met は、椅座安静の代謝量で 58.2 W/m^2 である。日本人の平均体表面積は、約 $1.6 \sim 1.7 \text{ m}^2$ 程度であるので、椅座で読書等をしている場合、人体から $100 \sim 200 \text{ W}$ の熱を出していることになる。

温冷感指標として、不快指数[2]は乾球温度と相対湿度より被験者実験に基づく統計的手法による回帰式から求められているが、気流、ふく射、着衣、代謝が考慮されておらず、温熱環境を正確に表している

は言い難い。熱中症予防によく用いられる湿球グローブ温度指標 WBGT[3]は気温、湿球温度、グローブ温度等から回帰的に温冷快適感を求めたものであり、着衣、気流が考慮されていない。MRT(平均放射温度:Mean radiant temperature)は人体を取り囲む全方向からの熱放射を、人体を覆う一様温度の黒体壁面からの赤外放射と等価とした場合の黒体壁面の温度を表す。都市設計の上で放射環境のみを議論する場合にはよく使用されるが、その他の環境要素を含まないためそのまま体感値として用いることはできない。

生理情報を組み込んだ温冷感指標として、日本では一般的に PMV, SET*が用いられてきた。PMV(Predicted Mean Vote) [4]は人体を均質一層と仮定し、温熱 6 要素を考慮した熱収支モデルにより算出される。被験者実験による温冷感申告からの回帰式をもとにその環境下での温冷感の算出が可能となっているが、基礎となった実験環境は無風、気温 19.9~27.8℃の比較的快適な状態を対象としている。SET*(Standard new effective temperature) [5]. は温熱感覚及び放熱量が実在環境におけるものと同等になるような相対湿度 50%RH の標準環境の気温と定義されている。SET*は温熱 6 要素をもとに 2 node モデルから温冷感を支配する平均皮膚温と皮膚濡れ面積率を算出しており、PMV よりも広い温熱条件の適用が可能である。しかし、SET*はオフィスなどの屋内環境での適用を前提に開発されたものであり、不快領域、非定常環境にそのまま用いることは望ましくない。暑熱環境下における生理反応で実際の温冷感とのズレが生じることが持田によって示されている[6]。実際の屋外環境では日射や高温となった路面からの赤外放射による熱負荷が屋内と比べて大きい場合を想定しなければならない。また、人間は屋外ではある種の運動状態にある場合が多く、代謝産熱の影響について詳細に調べる必要がある。天候の変化や場所の移動による熱環境の変化も頻繁に起こると考えられ、既往の指標では屋外空間にそのまま適用には問題があると言える。屋外環境に対応した温冷感指標としては、Hoppe[7]による PET、長野[8]による総合有効温度 ETU 等がある。また、島崎は環境 6 要素と生理量に基づく人体への熱収支からなる人体熱負荷量を温熱快適性指標として提案しており、屋外での被験者実験により効果を実証している[1]。

実際の生活においては空間の移動によって周囲の温熱環境が変化する。温熱環境に馴染む過程には人体の生理・心理状態は非定常的な状態にある。非定常状態では一般的に、同じ物理環境にあっても、暴露時間だけでなく、その人の環境への適応能力(発汗、血流量の調整能力)、それまでにいた温熱環境の履歴、その人の精神状態等の様々な要因を考慮する必要がある。生理量と心理量を直接結びつけて一般的に使えるモデルを作ることは難しいと言われている。人体の温熱生理モデルによる非定常温熱生理の予測は Gagge の 2 node モデル[5]でも可能であるが、2 node モデルは人体を 2 層の球と仮定しているためより緻密なモデルを用いることが望ましいとされる。Stolwijk のモデル[9]や Smith のモデル[10]では人体を複数部位に分割し、筋肉・骨・脂肪等の層に分類して血流による熱伝達を扱った詳細な生理量の予測が可能となっている。また、Fiala のモデル[11]ではこれらのモデルに改良を加え暑熱環境や寒冷環境にも対応可能であることを実験で示している。非定常温冷感予測は生理量の数値計算結果から回帰式により温冷感を予測する方法が多い。生理量と温冷感は被験者実験の結果を重回帰分析することで回帰式を求める手法が専らである。Fiala の生理予測モデルをベースにした UCI モデル[12]では平均皮膚温とその変化量、深部体温を説明変数として温冷感予測が可能であるとしている。

3. 屋外人体温冷感の評価

環境測定と被験者実験を行い、得られたデータから人体の熱収支を計算し、屋外環境の評価を行った[13]。人体の熱収支から得られる熱負荷量を人体熱負荷量[1]と定義し、これを用いて人体温冷感の予測を行うことの妥当性を検討した。屋外で日射環境が異なるエリアを対象に温熱環境に与える影響についても検討を行った。屋外環境の温熱環境への改善策として都市緑化が挙げられる。緑化では、樹冠による日射遮蔽効果、蒸散作用により葉温上昇を抑えることによる赤外日射削減効果などにより温熱環境の改善が期待される。高日射反射率を有する表面材料の使用も検討されている。

被験者周囲の環境条件として、気温、相対湿度、風速、日射量、赤外放射量の測定を行った。被験者の生理情報として、皮膚温、深部体温(鼓膜温)、心拍数、発汗量、体重の測定を行った。測定間隔は、風速以外は 20 秒ごと、風速は 0.1 秒ごとに測定した。水分蒸発量算出を目的とし、実験前後の体重変化量を体

重計で実験開始前と実験終了後の2回測定した。代謝量と心拍数との相関関係を被験者ごとに別途の実験で確認した。

被験者の服装は、Tシャツ、半ズボン、白色スニーカー、着衣量は0.3 cloとした。温冷感にはASHRAEの温冷感指標の日本語訳に基づき「非常に寒い(-3)」～「中立(±0)」～「非常に暑い(+3)」を線形尺度で記入した。被験者実験は30分間とし、温冷感は5分ごとに申告させた。被験者は健康な21～27歳の男子大学生、大学院生を対象とした。

人体が温熱適応状態にない暑熱状態では熱的非平衡状態にあると考えられる。このときの熱収支の残差は人体に加わる熱負荷となり、環境から人体への流入方向への熱収支を正として人体熱負荷量 F_{load} [W/m²] と定義する[1]。人体熱負荷量は式(1)で表される。

$$F_{load} = M - W + R_{net} - C - E \quad (1)$$

ここで、 F_{load} : 人体熱負荷量[W/m²]、M: 代謝量[W/m²]、W: 機械的仕事量[W/m²]、 R_{net} : 正味ふく射熱量[W/m²]、C: 顕熱損失量[W/m²]、E: 潜熱損失量[W/m²]

被験者実験として2013年に、大阪府立大学中百舌鳥キャンパス内で天空面が樹冠に覆われた地点とその近傍で比較的開けた地点の2条件で実験を行った[14]。実験期間は2013年8/3～8/28であった。実験は5ヶ所の緑化エリアと参照エリアを同時にそれぞれ2日間、合計10日間の測定を行った。気象要素を比較すると、緑化エリアは参照エリアと比べて気温が1℃程度低く、相対湿度は5～15%程度高かった。日射量は緑化エリアの樹冠の厚さの影響、天候の影響もあったが、ある場所では樹冠の影響により緑化エリアの日射量が参照エリアの1/10以下まで抑制されている場合もあった。被験者数は延べ60名であった。図1に今回の実験で測定対象としたエリアの風景を示す。

2014年の被験者実験では、測定対象として壁面、地表面からのふく射量の低減が見込まれる場所を選定した。壁面緑化条件は、壁面付近の樹木の遮蔽により壁面の温度上昇の抑制が行われ、赤外放射の低減効果が期待される。低木植栽条件は、垣根状の低木により路面からの反射日射、赤外放射の遮蔽効果が期待される。壁面緑化を施したエリアとその参照エリア、低木による緑化を施したエリアとその参照エリアの2条件4ヶ所をそれぞれ2日間、合計4日間の測定を行った。緑化エリアと参照エリアは2条件同時に被験者実験を行った。緑化エリアと参照エリアでは気温、相対湿度に大きな差はみられなかったが緑化の影響でふく射環境に一定の差がみられた。被験者実験は2条件4ヶ所で延べ24名行った。測定期間は2014年8/4～8/7に大阪府立大学中百舌鳥キャンパスで実験を行った。図2に今回の実験で測定対象としたエリアの風景を示す。

2015年の被験者実験では、測定場所として大阪府立大学中百舌鳥キャンパス内の建物屋上(防水シート)、その中庭(ウッドデッキおよび芝生)の地表面の日射反射率の違う3ヶ所を選定した。地表面の日射反射率はそれぞれ屋上が9.6%、ウッドデッキが14.1%、芝生が23.4%である。被験者は延べ18人で、実験は日中の10時～15時の時間帯に行った。同じ測定場所で1日に3名ずつ2日にわたって行った。測定期間は2015年9/28～10/16であった。

樹林、壁面緑化、低木植栽の測定データに対して、日射量と温冷感の相関を図3に、地表面からの赤外放射量と温冷感の相関を図4に示す。全天日射量は天候の違いや日射を遮蔽する物体の存在によって変動する。2013年の緑化エリアでは樹冠による緑化を対象としたため全天日射量が小さくなった。地表面から



図1 樹林と隣接する開放地

図2 壁面緑化、低木植栽

の赤外放射量は地表面温度の影響を受ける。日射量、赤外ふく射量と温冷感の相関は良好であった。人体熱負荷量と被験者の申告により得られた温冷感の相関を図5に示す。相関係数は $R=0.67$ となった。温冷感の申告値には個人差が大きいいため、複数の被験者をまとめると相関が小さくなることを留意するとこれは十分に高い相関である。従って、定常状態では人体熱負荷量は屋外環境における温冷感を予測することができると言える。

地表面の日射反射率が異なる開放地の測定データに対して人体熱負荷量と温冷感の相関を図6に表した。申告値の温冷感の個人差によりばらつきは見られるものの一定の相関は示していることがわかる($R=0.73$)。ここに示してあるデータは被験者実験中の全天日射量の5分ごとの変化率が20%以下の天候が安定していた時のデータであり、不安定な場合は、温冷感に対する非定常応答[15]についての検討が必要である。

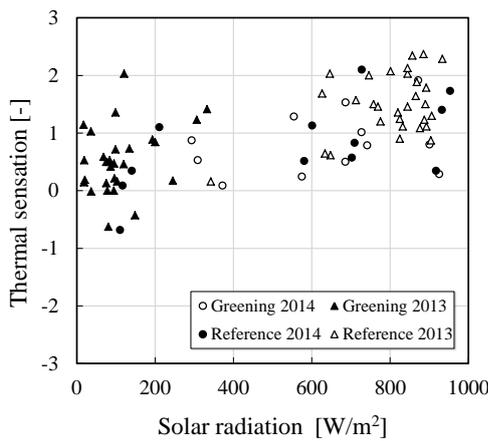


図3 全天日射量と温冷感の関係
(緑化 vs. 非緑化の場合)

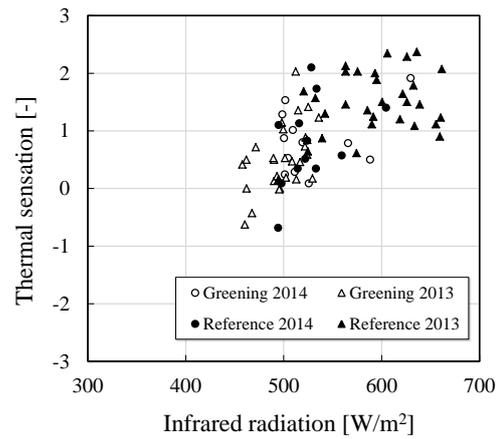


図4 地表面からの赤外放射量と温冷感の関係
(緑化 vs. 非緑化の場合)

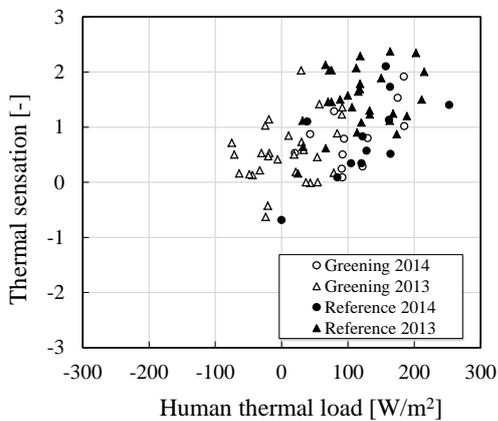


図5 人体熱負荷量と温冷感の関係
(緑化 vs. 非緑化の場合)

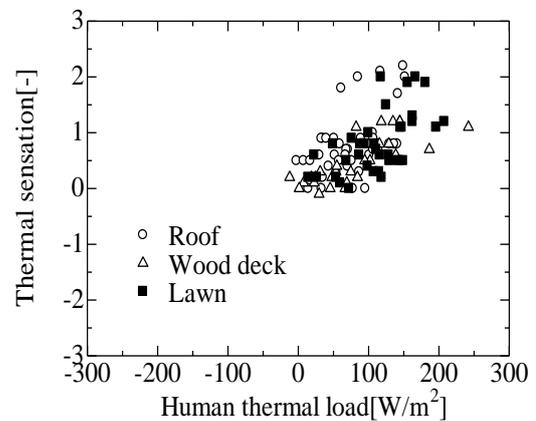


図6 人体熱負荷量と温冷感の関係
(異なる日射反射率の場合)

4. 日常生活における温冷感

人間の生理・心理応答を考慮した屋外空間における非定常温熱快適性指標の構築を目的とし、屋外空間において影響の大きいふく射量と代謝量が時間変化する条件で被験者実験を行った。その結果に基づき、説明変数を抽出し非定常温冷感の予測の定式化を行った[15]。

被験者周囲の環境条件として、気温、相対湿度、風速、ふく射量の測定を行った。被験者の生理情報として、皮膚温、深部体温(鼓膜温)、心拍数、呼吸代謝量、体重、血流量の測定を行った。

被験者の服装は、Tシャツ、半ズボン、白色スニーカー、着衣量は0.3 cloとした。温冷感はASHRAEの温冷感指標の日本語訳に基づき「非常に寒い(-3)」～「中立(±0)」～「非常に暑い(+3)」を線形尺

度で記入した。温冷感はふく射負荷実験，運動負荷実験では3分ごと，ふく射運動両負荷実験では5分ごとに申告させた。

ふく射負荷が時間変化する場合の被験者実験を2013年11月29日，12月2日に大阪府立産業技術総合研究所の人工気象室で行った。気温28℃，湿度50%RH，微風とした。メタルハライドランプを用い，日射波長域で1000W/m²程度（高さ150cm）であった。被験者はランプ照射エリア（日向）と，隣接する非照射エリア（日陰）を3分あるいは9分間隔で移動した。被験者は各条件共通の男子学生10名であった。

運動負荷が時間変化する場合の被験者実験を2014年7月～9月に関西大学の人工気候室内で行った。気温28℃，湿度50%RH，微風とした。運動負荷は自転車エルゴメーターの自転車運動による仕事量90Wの負荷を与えた。9分間の運動と3分間の静止安静の切り替えにより仕事量をステップ変化させた。上記の条件に加えて相対湿度を30%RHとして場合（90W30%RH条件），エルゴメーターの仕事量が120Wの場合（120W条件），60Wの場合（60W条件），安静の時間帯を9分とした場合（Long cycle条件），実験前5時間の水分摂取制限を与えた場合（Water restriction条件）の6条件を対象に実験を行った。90W30%RH条件と90W50%RH条件の2条件では共通の被験者6人で実験を行った。その他の条件では共通の被験者2人で実験を行った。

ふく射と運動負荷の両方が変化する場合の被験者実験を2014年9月2日，3日に大阪府立大学構内で行った。被験者は実験中に開放空間の日向エリアと街路樹に覆われた日陰エリアの移動によってふく射負荷の変化を，立位安静状態と往復歩行運動の切り替えによって運動負荷の変化を与えた。歩行速度は1m/sとした。図7に実験スケジュールを示す。被験者は2日間で共通の4人である。

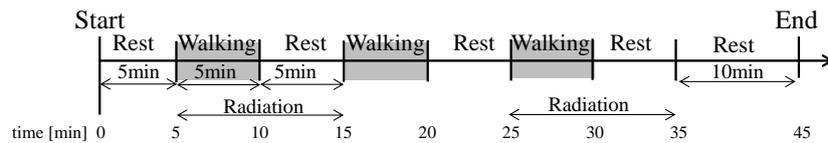


図7 実験スケジュール

負荷を与える前の定常状態にある被験者の生理量を初期値とし，平均皮膚温の初期状態からの偏差を T'_{skin} [℃]，深部体温の初期状態からの偏差を T'_{cor} [℃]と定義する。また，3分間の皮膚温の変化量を ΔT_{skin} [℃]と定義する。

図8にふく射負荷が時間変化する場合の ΔT_{skin} [℃]と温冷感の変化量の相関図を示す。 ΔT_{skin} [℃]と温冷感の変化量の間には線形相関がみられた。このことから皮膚温の変化量が人体の温冷感において重要な因子であると考えられる。図9に運動負荷が時間変化する場合のある時間の温冷感と温冷感申告から6分後の平均皮膚温の相関を示す。このときの相関係数は同じ時間における温冷感申告値と平均皮膚温の相関よりも高く，温冷感の変化に対する説明変数として適していると考えられる。

生理量を説明変数とした重回帰分析による温冷感の算出を行った。定常状態において人体の温熱状態を

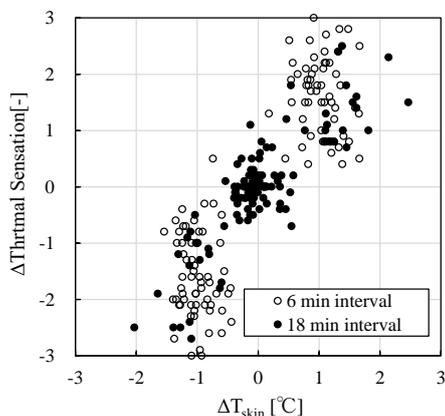


図8 ΔT_{skin} [℃]と温冷感の変化量の相関

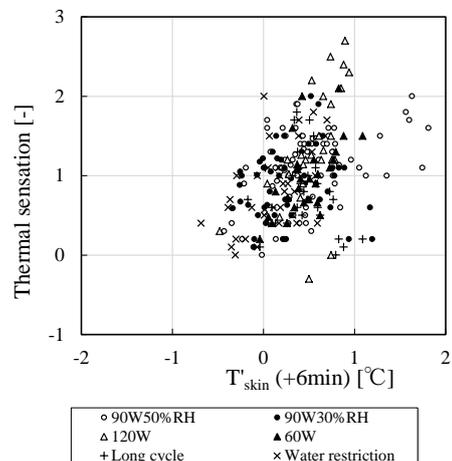


図9 温冷感と温冷感申告から6分後の平均皮膚温の相関

表すとされるのは平均皮膚温や深部体温とされている。ふく射負荷実験より皮膚温の変化量が，運動負荷実験では心拍数が温冷感と高い相関を示すことが示された。このことから重回帰分析の説明変数として T'_{skin} ， $\Delta T'_{skin}$ ， T'_{cor} ，に加え，代謝量の初期値からの偏差 M' [W/m^2]を対象とした。代謝変化実験では T'_{skin} よりも相関の高い温冷感申告時の3分後の T'_{skin} を説明変数とした。非定常温冷感予測式のふく射負荷時を式(2)，運動負荷化時を式(3)に示す。ここで PTS(Rad)，PTS(Metabo)はそれぞれふく射負荷時，運動負荷時の初期温冷感からの偏差である。式(4)にふく射，運動の両負荷が変化する場合の非定常温冷感予測式を示す。ここで PTS(Rad+Metabo)は初期温冷感からの偏差である。

人体数値モデルにより非定常空間での皮膚温と深部体温の算出を行い，非定常温冷感予測式からの予測温冷感の算出値と被験者の申告値との比較により予測式の精度検証を行った。Gagge らの 2 node モデル[5]に大岡らの代謝量の影響を組み込んだ発汗モデル[16]を導入して計算を行った。ふく射変化実験，代謝変化実験の被験者の温冷感申告値は全被験者の平均値を用いた。ふく射量代謝両変化実験では実験ごとに気象条件が異なっていたため，代表例として日射の強い時間帯に行った実験の解析を行った。図10にふく射変化実験の温冷感申告値と式(2)による予測温冷感を，図11に代謝変化実験の温冷感申告値と式(3)による予測温冷感を，図12にふく射代謝両変化実験の温冷感申告値と予測温冷感を示す。ふく射変化実験では精度よく温冷感を予測できていたことがわかる。代謝変化実験では申告値と予測値は定量的にはズレがみられたものの温冷感の変化傾向は掴めていた。ふく射代謝両変化実験ではやや精度が落ちるものの被験者の温冷感の変化を表すことができていた。

$$PTS(Rad) = 0.79T'_{skin}(t) + 0.39\Delta T'_{skin}(t) \quad (2)$$

$$PTS(Metabo) = 0.6T'_{skin}(t+3) + 0.71T'_{cor}(t) + 0.0043M'(t) \quad (3)$$

$$PTS(Rad + Metabo) = \frac{1}{2} \{0.79T'_{skin}(t) + 0.67T'_{skin}(t+3)\} + 0.39\Delta T'_{skin}(t) + 0.71T'_{cor}(t) + 0.0043M'(t) \quad (4)$$

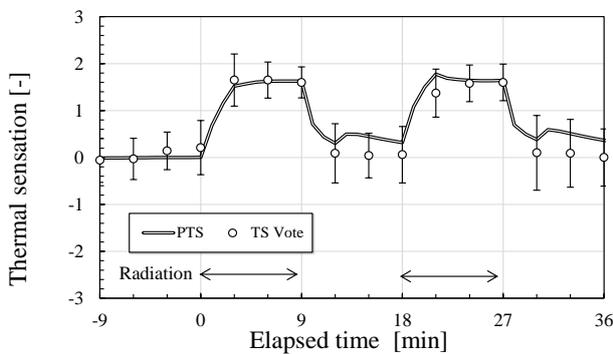


図10 ふく射負荷実験の温冷感申告値と予測温冷感

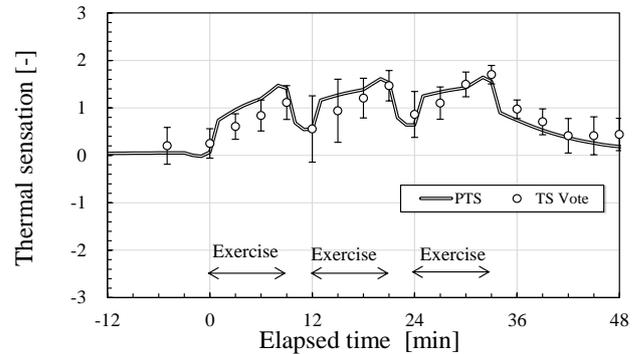


図11 運動負荷実験の温冷感申告値と予測温冷感

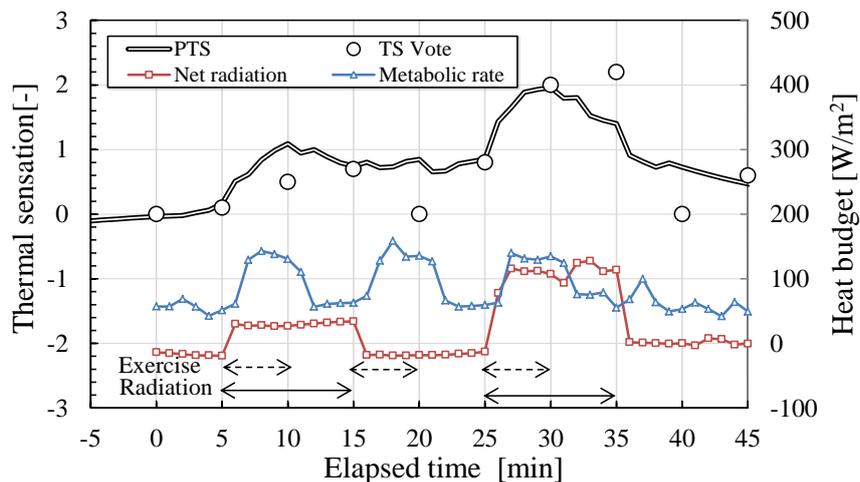


図12 ふく射と運動の両負荷実験の温冷感申告値と予測温冷感

5. まとめ

種々の条件下で被験者実験を行い、屋外温冷感の予測の可能性について検討を行った。以下にその結果をまとめる。

- (1) 対象としたすべての緑化、日射反射率の異なる地表面に対して、温冷感と人体熱負荷量の相関は高い結果となった。従って、ふく射環境の異なる屋外の温冷感を定量的に評価が可能となり、熱環境設計の指針となり得ることが明らかとなった。
- (2) ふく射量が変化する場合、平均皮膚温の（3分間の）変化量と温冷感の（3分間の）変化量の間には強い相関関係がみられた。代謝量が増加する場合において時間遅れを考慮した皮膚温は温冷感との相関が認められた。重回帰分析により非定常温冷感の予測式の算出を行った。単独の負荷の線形結合により複合的な熱負荷の非定常温冷感の予測が可能であることを示した。

参考文献

- [1] 島崎康弘ら、人体熱負荷量に基づく温熱快適性指標の提案，日本冷凍空調学会論文集，**26**-1，113-120，2009.
- [2] E. C. Thom, A new concept for cooling degree days, *Air Condit. Heat Ventil.*, **54**, 73-80, 1957.
- [3] JIS Z8504, 人間工学－WBGT(湿球黒球温度)指標に基づく作業者の熱ストレスの評価－暑熱環境，1999.
- [4] P. O. Fanger, “Thermal Comfort”, Danish Tech. Press, 1970.
- [5] A. P. Gagge, et al., A standard predictive index of human response to the thermal environment, *ASHRAE Trans.*, **92**-1, 709-731, 1986.
- [6] 持田徹，新有効温度ET*の成果・特徴と問題点，日本生気象学会雑誌，**29**，135-139，1992.
- [7] H. Mayer and P. Hoppe, Thermal comfort of man in different urban environments, *Theoretical and Applied Climatology*, **38**-1, 43-49, 1987.
- [8] 長野和雄，堀越哲美，屋外及び不均一環境下に適用可能な総合体感指標の開発，日本建築学会環境系論文集，**76**，131-139，2011.
- [9] J. A. J. Stolwijk and J. D. Hardy, Control of body temperature, *Handbook of Physiology, Reactions to Environmental Agents*, DOI: 10.1002/cphy.cp090104, American Physiology Society, 2011.
- [10] C. E. Smith, A transient, three-dimensional model of the human thermal system, Ph.D. Dissertation, Kansas State University, 1993.
- [11] D. Fiala, et al., First principles modeling of thermal sensation response in steady-state and transient conditions, *ASHRAE transactions*, **109**, 179-186, 2003.
- [12] D. Fiala, et al., UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation, *Int. J. Biometeorol.*, **56**-3, 429-441, 2012.
- [13] 吉田篤正ら，ふく射環境が異なるエリアにおける屋外人体温冷感の評価，日本建築学会大会（九州）学術講演梗概集，環境工学 I，887-888，2016.
- [14] A. Yoshida, et al., Evaluation of effect of tree canopy on thermal environment, thermal sensation, and mental state, *Urban Climate*, **14**, 240-250, 2015.
- [15] 吉田篤正ら，ふく射，運動の時間的な変化を組み込んだ温冷感の予測，日本建築学会大会（関東）学術講演梗概集，環境工学 I，637-638，2015.
- [16] 南百合子ら，2 ノードモデルにおける発汗モデルの改良と暑熱環境安全性評価への適用，日本建築学会環境系論文集，**73**-623，107-114，2008.