

平成 22 年 5 月 17 日現在

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2008～2009

課題番号：20760386

研究課題名（和文） 個人差を考慮した熱中症リスク評価指標の開発

研究課題名（英文）

Development of index for evaluating a risk of heat disorder considering individual variability

研究代表者

栗原 浩平（KUWABARA KOUHEI）

北海道大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：40374582

研究成果の概要（和文）：個人差（心肺能力，暑熱順化）が生理量に及ぼす影響を既往の研究データと被験者実験により検討した。暑熱環境における直腸温を，作業強度起因の直腸温と暑さ起因の直腸温の増分として定義し，個人の心肺能力（最大酸素摂取量）を考慮することを可能にした。次に暑熱順化が発汗量および着衣のぬれに及ぼす影響について検討し，平均皮膚温 36℃を境に暑熱順化前後の発汗量と着衣のぬれの特性に差が見られた。

研究成果の概要（英文）：The effect of individual variability of cardiorespiratory capacity and heat acclimatization on human physiological reaction was studied by using subjective experiments and early works. Rectal temperature in a hot environment was defined as functions of maximal oxygen uptake, metabolic rate, mean skin temperature. The effect of heat acclimatization on sweat rate and clothing wettedness was studied. The relationship between mean skin temperature and sweat rate were different around mean skin temperature of 36 degrees C.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	800,000	240,000	1,040,000
2009 年度	400,000	120,000	520,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,200,000	360,000	1,560,000

研究分野：人間—熱環境工学

科研費の分科・細目：建築学・建築環境・設備

キーワード：熱中症，平均皮膚温，体内温，発汗量，個人差，心肺能力，暑熱順化，着衣のぬれ，暑熱環境

## 1. 研究開始当初の背景

(1) ISO-7243 で暑熱ストレスに対する評価指標として湿球グローブ温度（WBGT）が採用されており，作業強度毎に作業中止の基準値が設定されている。基準値は深部体温が 38℃を超えない値として設定していると記載さ

れているものの，環境物理量である WBGT 値と人体との熱ストレス要因との関連は不明なのが最大の難点である。

(2) この許容基準は，労働作業を想定しているにもかかわらず，現在ではスポーツ中の熱

中症予防のための指針としても採用されている。しかしながらスポーツ中の青少年に対してこの許容基準をそのまま適用することは危険であり、さらには屋内での暑熱弱者に対しては直接適用できない。

(3) 人体生理量は、温熱環境はもちろんのこと、人の鍛錬度合い（心肺能力）や暑さに対する馴れ（暑熱順化）の有無、年齢、性別といった様々な要因に支配されており、種々の条件に適用可能な基準値を設定することが肝要である。

## 2. 研究の目的

(1) 著者らは暑熱環境評価のための平均皮膚温予測モデルに関する研究に従事している。モデルでは、無効発汗に伴う発汗効率の減少や着衣のぬれの影響、さらに発汗特性の個人差を考慮した平均皮膚温等の予測が可能であり、屋内外の被験者実験によりその有効性が検証されている。

(2) また心拍数を“作業強度起因心拍数”と平均皮膚温上昇に伴う“暑さ起因心拍数”の和として定義し、心肺能力のパラメータとして最大酸素摂取量  $VO_{2max}$  を導入することで、初めて個人の心肺能力と暑熱負担を考慮した心拍数予測式を提案しており、暑熱環境下における人体生理量の予測に対応しつつある。

(3) そこで本研究では、心肺能力や暑熱順化といった個人特性が人体生理状態に及ぼす影響を文献データと実験により明らかにし、個人差を考慮した人体生理量予測モデルを開発することを目的とする。

## 3. 研究の方法

(1) 個人の心肺能力が人体生理状態に及ぼす影響を把握するために、既往の研究データを用いて検討を行った。著者らの既往の実験データに加え、 $VO_{2max}$ 、平均皮膚温、直腸温、心拍数、発汗量等が実測されている論文からデータを収集した。収集したデータから、 $VO_{2max}$  が平均皮膚温と直腸温の関係に及ぼす影響を検討し、個人の心肺能力を考慮した直腸温の予測式を提案する。

(2) 既往の研究データを用いて、暑熱順化前後の平均皮膚温と発汗量の関係について比較検討した。また暑熱馴化が着衣のぬれに及ぼす影響を把握するために被験者実験を行った。成年男性3名の被験者に代謝量3.96met、外部仕事0.83metの自転車エルゴメーター運動を90分間行わせた。室温は20~35℃、相対湿度は約45%とした。また35℃、60%の環境で自転車エルゴメーター運動を6日間（1時間/日）行い、暑熱馴化させた。

## 4. 研究成果

(1) 厚生労働省の人口動態調査を基に、熱中症による死亡数の経年変化や発生場所との関連についての検討を行った。図1は、年齢別の死亡数と死亡率の経年変化である。年齢別に見ると、93年までは65歳以上の高齢者の割合が3~5割程度であるのに対し、94年以降は6割を超える割合にある。また家庭での発生割合は、95年以降15%程度であったものが、近年3~5割程度に上昇しつつある。熱中症は屋外の炎天下のみならず室内においても発生割合が年々高まっている。1995年以降の家庭における死亡数を年齢別に示したグラフが図2である。65歳以上が7割を占めており、家庭においては高齢者による死亡数が大半であることが示されている。室内における熱中症を防ぐためには高齢者による死亡事故の発生を抑制することが最も重要である。

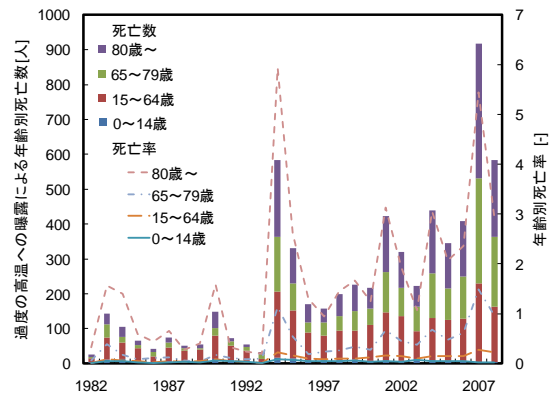


図1 年齢別死亡数と年齢別死亡率

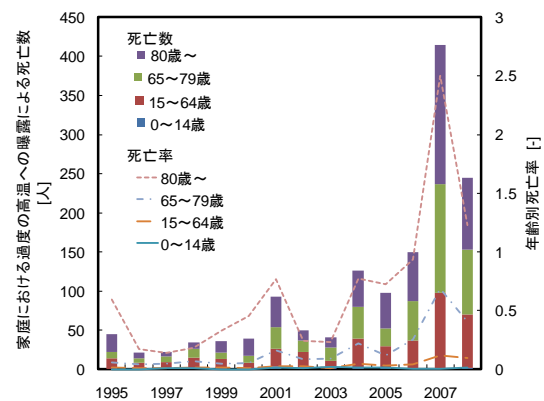


図2 家庭における年齢別死亡数と年齢別死亡率

(2) Saltin らは、体内温度を絶対的な作業強度である酸素摂取量  $VO_2$  で表すと個人によりばらつきが生じるが、相対的な作業強度である  $\%VO_{2max}$  で表すと個人のばらつきがなくなり直線的に増加することを示している。このことから直腸温度も  $\%VO_{2max}$  で表すこと

で心肺能力を考慮した予測が可能と考えられる。そこで直腸温度を心拍数と同様、作業強度起因の直腸温度と暑さ起因の直腸温度の和として式(1)のように定義する。

$$t_{re} = t_{ren} + \Delta t_{re} \quad (1)$$

ここで、 $t_{re}$  : 直腸温度[°C],  $t_{ren}$  : 相対的な作業強度に伴う直腸温度[°C],  $\Delta t_{re}$  : 皮膚温上昇(暑さ)に伴う直腸温度の増加分[°C]

図3に既往の研究データを用いた被験者別の%VO<sub>2max</sub>と直腸温度の関係を表す。被験者によるばらつきはほとんどなく、直線的に増加していることがわかる。 $t_{ren}$ を%VO<sub>2max</sub>の関数とし、近似式として式(2)を得た。

$$t_{ren} = 36.67 + 0.0284 \cdot \%VO_{2max} \quad (2)$$

次に暑さ起因による直腸温度の増加について、実験データより検討を行った。図4は、平均皮膚温が36°Cを超える温域での、%VO<sub>2max</sub>毎の平均皮膚温 $t_{sk}$ と直腸温 $t_{re}$ の経時変化を示したものである。%VO<sub>2max</sub>によらず実験開始直後から平均皮膚温、直腸温が共に上昇を始めている。温度上昇率は、開始直後は平均皮膚温の方が直腸温よりも大きい。しかし120分間にわたるデータ全体をみると、直腸温と平均皮膚温の両者が並行して上昇している傾向が読み取れる。特に70分以降は、両者の温度差はほぼ一定で推移している。図5は、平均皮膚温が36°Cを超える温域における、直腸温と平均皮膚温の差を経時的に示したものである。実験開始直後は両者の温度差は減少し、その後20分辺りで上昇に転じ、70分程度以降は、両者の温度差はほぼ一定になっていることが読み取れる。図6は、直腸温と平均皮膚温の関係を示したものである。両者の差がほぼ一定と見なし得る時間帯(100~120分)の平均値ならびに実験時間60分以上の既往の研究データをプロットしたものである。30%VO<sub>2max</sub>の作業における直腸温は、皮膚温が34°C辺りまでは作業強度起因の直腸温 $t_{ren30} = 37.52^\circ\text{C}$ であり皮膚温上昇の影響を受けない。その後次第に増加して $t_{re} = t_{sk} + 1.5$ の直線に漸近していることがわかる。40%VO<sub>2max</sub>の作業における直腸温と平均皮膚温の関係は30%VO<sub>2max</sub>と同様の特性を有し、直腸温は作業強度起因の $t_{ren40} = 37.81^\circ\text{C}$ から漸近線 $t_{re} = t_{sk} + 2.0$ に移行している。

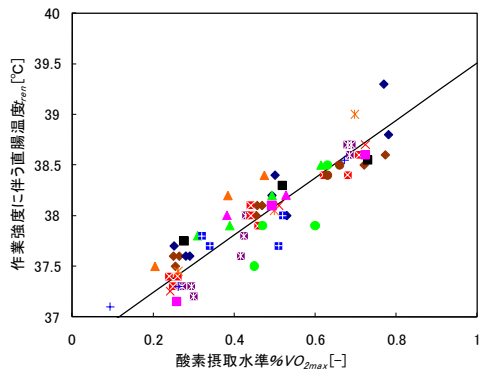


図3 酸素摂取水準%VO<sub>2max</sub>と作業強度に伴う直腸温度 $t_{ren}$ の関係

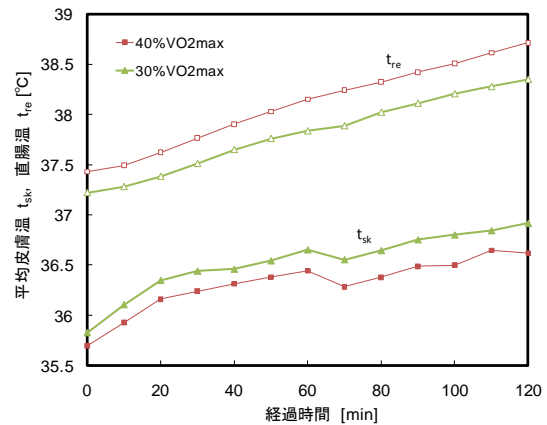


図4  $t_{sk} = 36^\circ\text{C}$ を超える温域、30、40%VO<sub>2max</sub>別、平均皮膚温 $t_{sk}$ と直腸温 $t_{re}$ の経時変化

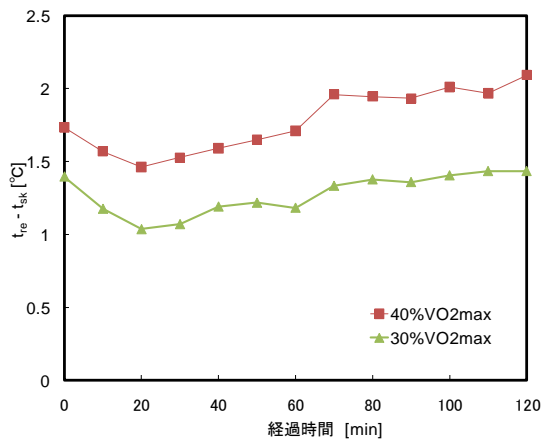


図5  $t_{sk} = 36^\circ\text{C}$ を超える温域、30、40%VO<sub>2max</sub>時、直腸温と平均皮膚温の差の経時変化

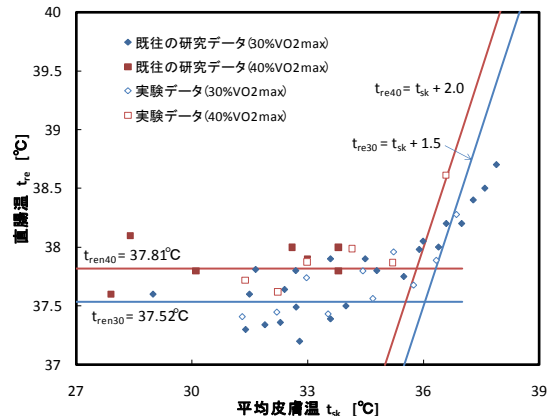


図6 平均皮膚温と直腸温の関係

(3) 人体皮膚表面における熱収支式(3)に著者が提案している発汗と平均皮膚温、無効発汗と着衣のぬれに係わるモデルを組み込むことにより温熱環境6要素から平均皮膚温・発汗量を求める。式(4)に示す有効発汗量は、全発汗量から環境の蒸発容量を超える発汗

量を除いたものである。同式には、 $q_{dr}$  が着衣をぬらすことによる蒸発増加量 ( $k_{dr}q_{dr}$ ) を加えてある。温熱性発汗を式(5)に示すように皮膚温上昇起因の発汗と体内温上昇に起因する発汗に分ける。いずれも平均皮膚温の一次関数として表す。同式の「個人差係数  $k_{adp}$ 」に着目して暑熱馴化の影響を評価した。

$$q_H - q_s = q_{res} + q_{dif} + q_{swev} + q_{rc} \quad [W/m^2] \quad (3)$$

$$q_{swev} = (q_{swe} + q_{swt}) - q_{dr} + k_{dr}q_{dr} \quad (4)$$

$$q_{swt} = k_{adp} \{ k_{swsk}(t_{sk} - t_{sksw}) + k_{swcr}(t_{sk} - t_{skcr}) \} \quad (5)$$

(右辺第2項：体内温上昇起因発汗，適用範囲  $t_{sk} > t_{skcr}$ )

ここで、 $q_H$ ：産熱量 (=  $q_M - q_{wk}$ )， $q_M$ ：代謝密度， $q_{wk}$ ：外部仕事， $q_s$ ：人体の単位時間当たりの蓄熱量， $q_{res}$ ：呼吸による熱流量密度， $q_{dif}$ ：皮膚拡散による水分蒸発熱流量密度， $q_{swev}$ ：皮膚表面で蒸発する有効発汗蒸発熱流量密度， $q_{rc}$ ：着衣のぬれを考慮した顕熱流量密度， $q_{swe}$ ：運動性発汗の蒸発熱流量密度， $q_{swt}$ ：温熱性発汗の蒸発熱流量密度， $q_{dr}$ ：無効発汗原量， $k_{dr}$ ：有効発汗増加率[n.d.]， $k_{adp}$ ：個人差係数[n.d.]， $k_{swsk}$ ：温熱性発汗の皮膚温に関する係数(=28)[W/(m<sup>2</sup>・K)]， $k_{swcr}$ ：温熱性発汗の体内温に係る係数(=128.5)[W/(m<sup>2</sup>・K)]， $t_{sk}$ ：平均皮膚温[°C]， $t_{sksw}$ ：温熱性発汗が始まる臨界平均皮膚温[°C]， $t_{skcr}$ ：体内温上昇による温熱性発汗が始まる臨界平均皮膚温[°C]

検証には皮膚温・発汗量が定常に達していると考えられる実験時間が40分以上の既往の研究データを用いた。また暑熱馴化後に関しては室温35°C以上の高温環境下で少なくとも6日以上連続で馴化試験を行ったものを選定した。暑熱馴化後の特性を、暑熱馴化前の特性と比較したのが図7、8である。図7が椅座時、図8が産熱量3metのデータである。それぞれ、 $k_{adp} = 1$ と2の予測線を記載してある。いずれも暑熱馴化後は平均皮膚温が体内温上昇の臨界皮膚温35~36°Cを超える辺りから蒸発熱流密度発汗量が急上昇し、 $k_{adp} = 2$ の特性線に近い特性を有することが読み取れる。このことから、暑熱環境下で作業をする場合における事前の暑熱馴化対策の有効性が示唆される。

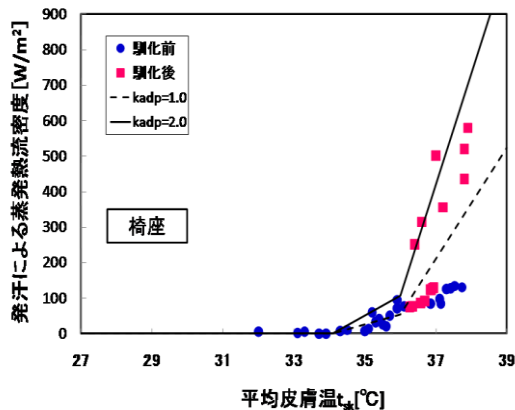


図7 暑熱馴化前後の平均皮膚温と発汗量の関係 (椅座)

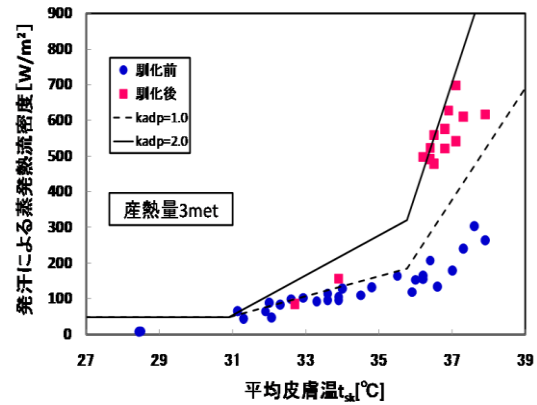


図8 暑熱馴化前後の平均皮膚温と発汗量の関係 ( $q_H = 3\text{met}$ )

(4) 暑熱馴化が着衣のぬれに及ぼす影響を把握するために温熱環境試験室にて被験者実験を行った。暑熱馴化前後の平均皮膚温に対する直腸温、心拍数はいずれも暑熱馴化後に減少していることから、暑熱馴化トレーニング前後に有意な差が存在すると考えられる。図8に平均皮膚温と発汗量の関係を示す。グラフ上の実線は  $k_{adp} = 1$  と 2 の発汗密度の予測線である。本実験では、皮膚温36°C付近から発汗量が若干増加しているものの暑熱馴化トレーニング前後に差は見られなかった。暑熱馴化トレーニングは直腸温と心拍数に対しては効果が見られたが、本実験範囲では発汗に関しては効果が見られなかった。

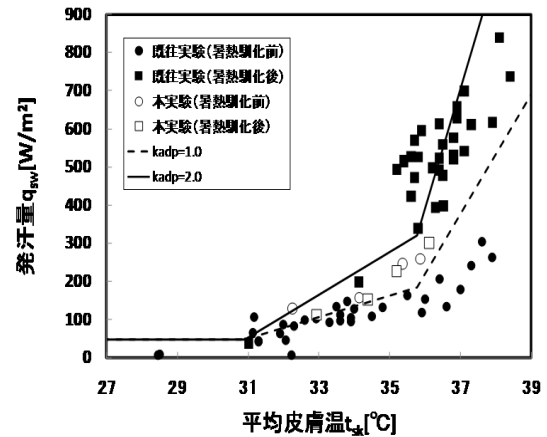


図8 平均皮膚温と発汗量の関係

(5) 図9に発汗ぬれ率と相当無効発汗率の関係を示す。実線が相当無効発汗率(=  $q_{dr}/q_{sw}$ )、破線は同56%値線を表す。プロットは本実験結果で、全発汗量に対する着衣重量の増加量の割合で表される。暑熱馴化前後で顕著な差はみられず、無効発汗の56%程度が着衣に残る結果となった。この結果を参考にして、着衣のぬれに伴い残りの44%が体温調節に寄

与する有効発汗として蒸発したものと仮定して有効発汗増加率  $k_{dr} = 0.44$  として予測モデルに導入した。著者らの既往の実験では  $k_{dr} = 0.6$  が得られているが、この差は着衣の素材（既往の実験ではポリエステルを含む、本実験では綿 100%）の違いが原因であると考えられる。本実験から得られた着衣のぬれの影響 ( $k_{dr}=0.44$ ) を考慮し、体内温上昇に伴う温熱性発汗を暑熱馴化トレーニング前後の被験者に対して適用し、式(3)を用いて平均皮膚温の予測を試みた。図 10 は平均皮膚温の予測値と実測値を比較したものである。予測値と実測値は良く一致することが示された。

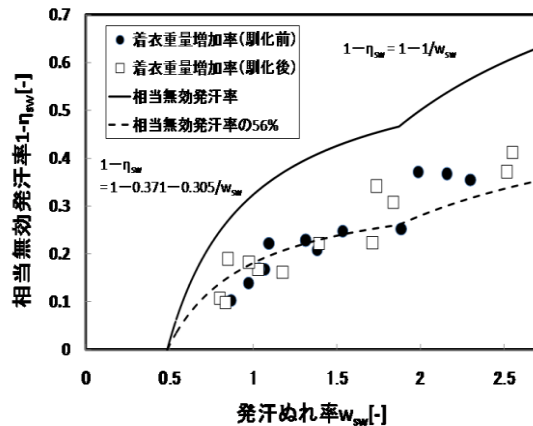


図9 暑熱馴化前後の着衣のぬれ

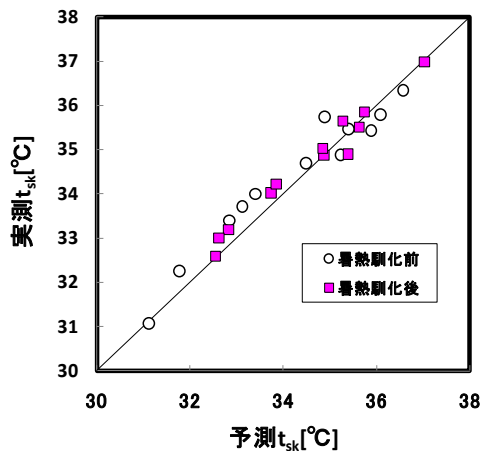


図10 平均皮膚温の予測値と実測値の比較

(6) 本研究により、個人の心肺能力ならびに暑熱順化が直腸温と発汗量、着衣のぬれに及ぼす影響が明らかとなった。今後、著者らの平均皮膚温予測モデルを基に、他の個人特性（年齢、性別等）を考量した直腸温、心拍数、発汗量の予測式を導くことで、個人差に対応した熱中症リスクの評価や評価基準の設定が可能となる。また、最大酸素摂取量を考慮した平均皮膚温と直腸温度、心拍数の関係については、熱中症による死亡数の多い高齢者等の暑熱弱者に対しても適用可能か検討する必要がある。

## 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計1件）

- ① 栞原浩平, 窪田英樹, 濱田靖弘, 中村真人, 中谷則天, 雨宮智史, 長野克則, 無効発汗と着衣の濡れを考慮した屋外環境における平均皮膚表面温度の予測, 空気調和・衛生工学会論文集, 査読有, No.144, 2009, pp.1~10.

〔学会発表〕（計5件）

- ① 林健太郎, 栞原浩平, 窪田英樹, 濱田靖弘, 中村真人, 池田光毅, 長野克則, 暑熱順化を考慮した平均皮膚温・発汗量予測モデルに関する研究, 空気調和・衛生工学会北海道支部第44回学術講演会論文集, 2010, pp.35~38.
- ② 池田光毅, 栞原浩平, 窪田英樹, 濱田靖弘, 中村真人, 長野克則, 熱中症の予防等暑熱環境評価のための体温予測モデル（第9報）非定常状態における平均皮膚温, 体内温の予測, 平成21年度空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 2009, pp.1295~1298.
- ③ 栞原浩平, 窪田英樹, 濱田靖弘, 中村真人, 池田光毅, 長野克則, 高温環境における非定常時の体内温度の予測, 空気調和・衛生工学会北海道支部第43回学術講演会論文集, 2009, pp.71~74.
- ④ 池田光毅, 栞原浩平, 窪田英樹, 雨宮智史, 濱田靖弘, 中村真人, 長野克則, 熱中症の予防等暑熱環境評価のための体温予測モデル（第8報）暑熱環境における体内温度とWBGTの関係, 平成20年度空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 2008, pp.1181~1184.
- ⑤ 雨宮智史, 栞原浩平, 窪田英樹, 濱田靖弘, 中村真人, 長野克則, 池田光毅, 熱中症の予防等暑熱環境評価のための体温予測モデル（第7報）平均皮膚温と酸素摂取水準（%VO<sub>2max</sub>）を用いた心拍数, 体内温度の予測, 平成20年度空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 2008, pp.1181~1184.

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

栞原浩平 (KUWABARA KOUHEI)  
北海道大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号：40374582

### (2)研究協力者

窪田英樹 (KUBOTA HIDEKI)  
北海道大学・大学院工学研究科・元教授  
研究者番号：90002930  
濱田靖弘 (HAMADA YASUHIRO)

北海道大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：40280846

中村真人 (NAKAMURA MAKOTO)

北海道大学・大学院工学研究科・技術専門  
職員

研究者番号：60374592

長野克則 (NAGANO KATSUNORI)

北海道大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：80208032

池田光毅 (IKEDA KOKI)

北海道大学・大学院工学研究科・修士課程

林健太郎 (HAYASHI KENTARO)

北海道大学・工学部・学士課程