（４）人間生活環境の温熱的快適性評価によるＱＯＬ向上のためのウェアラブルシステム開発に関わる研究プロジェクト　（総括 : 薩本弥生）

1. プロジェクトの目的・背景

背景

20 世紀後半の経済的な発展により、我が国の生活環境の基盤は飛躍的に整備された。一方、急速な少子高齢化社会の到来を迎えたために高齢者、障害者、幼児といった社会的弱者の予防医学的な環境整備に加えて､核家族化に伴い労働人口世代の生活習慣病予防や健康増進もその重要性を増している。

こうした社会状況にあっては、医学的な治療技術の向上に加えて日常生活における健康状態・快適性の向上を図ることは、健康国家の実現と予防医学並びに介護環境の充実に大きく貢献することが可能であり、国民の QOL 向上において必要不可欠な開発技術である。人間周りの温熱環境の改善のためには、実際の生活環境での温熱環境状態計測を継続して行う必要がある。

目的

暑熱環境下のスポーツ時には、熱中症が毎年多数、報告されている。現在の熱中症予防のための運動指針には、人体の熱収支に影響の大きい気温、湿度、輻射熱の 3 つを取り入れた WBGT（湿球黒球温度）が用いられているが、被験者の生理量と組み合わせての細やかな対策がなされていない現状では、運動指針としては、不十分といえる。そこで、被験者の個別の状況に応じて病的状態にならないうちに運動を中断するために、熱中症への移行状態の早期把握と、その予防システムの構築が必要である。そこで、本研究では、特にスポーツ時の熱中予防に向けて、まず、温熱環境の人、着衣、環境に関わる温熱環境物理量を計測し無線で集積し、同期して人の温熱的快適性の指標となる温熱生理計測（耳型体温計、心拍計や脈拍計、代謝量、皮膚温、衣服内気候等）ができる、被験者に装着負荷が少なく、常時モニタリング可能な無線機能付きのウェアラブルシステムを開発し、着装時の環境状態計測評価を試みる。さらには、ウェアラブルシステムでの計測・解析・評価を行い、運動時の常時モニタリングシステムへ応用し、熱中症予防に貢献するシステムを構築することを目的とする。

2. プロジェクトの概要と実施担当者

研究組織

研究代表者：薩本弥生：横浜国立大学・教育人間科学部・教授
（MICT 医療情報システムの創生部門所属）
研究分担者：杉本千佳：横浜国立大学大学院・工学研究院・准教授
（MICT 医療情報システムの創生部門所属）
田中英登：横浜国立大学・教育人間科学部・教授
（MICT 医療情報システムの創生部門所属）
小泉淳一：横浜国立大学大学院・工学研究院・教授
（MICT 医療情報システムの創生部門所属）

プロジェクトの概要と研究分担

目的に記載した研究項目を研究期間中に実施し成果をとりまとめる。

温熱的快適性評価のためのフィールド計測における拘束条件をもとに、これまでの実験室環境での評価手法とは異なる新たな評価指標を構築することを目指す。実際の生活環境での着衣の温熱環境状態計測を行うため、ウェラブルな無線型のセンサを用いるが、被験者に負担が少なくかつ精度を保つための新たなシステム設計を進める。主にセンシングシステムの設計及び無線通信技術については杉本准教授にご担当いただく。研究の進め方としては、既存の、あるいは開発したデバイスを組合せて用いて計測実験をし、データ解析を行うことにより快適性評価指標確立を検討するとともに、有効な

指標をより効率的にセンシングするための独自の小型デバイスシステムの設計、製作を行う。具体的には、センサシステム等の小型・高性能化と適切なデータ送信手法の採用による高信頼化・低消費電力化を目標とする。温熱的快適性評価のための温熱環境および温熱生理計測の評価項目を厳選および、無線システムによる計測各項目データの人工気候室内での計測による精度評価は田中先生・薩本を中心に実施する。

スポーツ時の熱中症予防に向けてウェアラブルシステムの計測・解析・評価は、田中先生と薩本で担当する。田中先生は、暑熱環境下における補給水温の影響、暑熱順化の影響、夏季冷房時の快適性に気流の及ぼす影響についても検討されている。小泉先生は消防士の活動不能状態を予見した睡眠時参照型自律神経機能指標での心電の解析等、感性評価の応用を検討されている。本年度は自律神経揺動周期の測定と測定プロトコルを検証される。

3. 主要な研究成果

（1）ウェアラブル BAN システムの改良

作年度、杉本准教授の元、温熱的快適性評価のための温熱生理計測の評価項目を厳選し、被験者への負担が低減され、かつ、リアルタイムにデータ観測できるような無線センサシステムを開発した。BAN 無線システムのセンサは、①耳装着型体温計、②小型温湿度計、③小型温度計（皮膚表面温測定）④心拍・温度・3 次元加速度計（活動量計測）、⑤小型軽量のデータロガから構築される（Fig.1 参照）。今年度は BAN 無線センサシステムの小型化・高信頼化・ユーザビリティ向上、部材の変更、電池の小型化・低消費電力化、実装の工夫を行うことにより、衣服内気候および体温、皮膚温を含むシステムの小型化と頑強化を実現した。このシステムを用いることで、フィールド環境および人工気候室で低拘束に温熱環境下での生体情報計測・評価実験を行うことが可能になった。本年度は昨年度に引き続き、このシステムを用いてフィールド環境および人工気候室で実験に用い、暑熱環境下での運動発汗時を含めた様々な環境下でシステム評価を行った。

Fig.1 ウェアラブル BAN システムの配置図

一方、現状では、まだ、環境の温熱環境計測値、活動量、生理量の因果関係と人の温熱的快適性の指標となる温熱感覚指標の因果関係が曖昧である。今後、各種スポーツ時のデータを蓄積し、これらの各種スポーツ時のデータの因果関係を明らかにし、環境条件、着衣量、運動負荷による体温や心拍、衣服内気候の値や上昇度などを指標にして、常時モニタリングシステムへ応用し、現状の熱中症予防の運動指針よりきめ細やかな熱中症リスクを個別対応に評価できる新たな評価指標作りを検討する。

次年度は、以上を踏まえスマートフォンを用いたネットワーク接続できるシステムの構築をめざす。

(2)熱中症予防のための支援システムの環境温熱評価システムの構築

目的：暑熱環境下のスポーツ時には、熱中症が毎年多数報告されており、暑熱馴化が起きていない春先には、比較的温暖な温度域で熱中症を発症する事例もある。

そこで現行の最もメジャーな温熱物理指標である WBGT を用い、昨年度構築した熱中症予防警報システムを用いて 6 月～9 月の夏季の部活動中の熱中症予防のために WBGT を元にした警報メール配信とともに毎日の部活動の活動レベルや着衣状況等の調査を実施し、現行の熱中症予防システムが環境把握・改善に寄与するか、効果と課題を明らかにすることを目的とする。

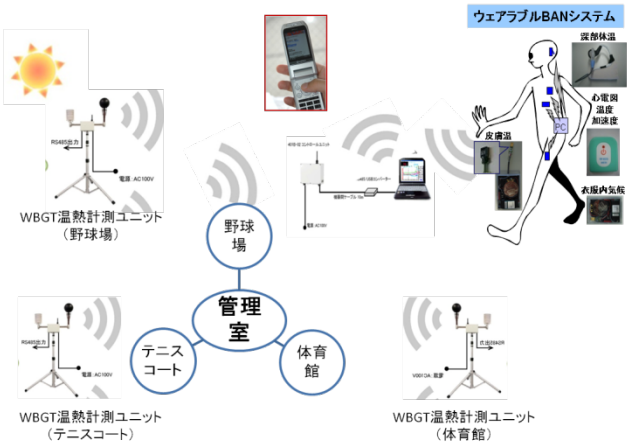


Fig.2 熱中症予防のための支援システムの構築

方法：現在の熱中症予防のための運動指針には、人体の熱収支に影響の大きい気温、湿度、輻射熱の3つを取り入れたWBGT（湿球黒球温度）が主に用いられて、警戒レベルが5段階に規定されている。前述のように昨年度、屋外・屋内での運動中の熱中症予防のために運動場2箇所（テニスコートと野球場）と体育館にWBGT計測機を設置し、無線で受信できるシステムを構築した（Fig.2）。5段階の警戒レベルのうち、指定段階以上（現在レベル 2 指定）になると、レベルが上がるタイミングで、1日に最大4回あらかじめ登録されている携帯メールに送信することにより、熱中症予防警報を配信した。また、昨年の予備調査により部活動開始時刻が16時頃の部活が多かったため、毎日16時にも定時メールを配信した。さらに本学の課外活動中の部員等を対象に協力を要請し、6月～9月の夏季の部活動中に、このシステムの警報がどの程度、主観とあっているか等の、アンケートを実施した。配信対象者と調査対象者がすべて同じではないため、配信対象者と調査対象者を分けて示す。メール配信対象者は本学大学生・大学院生（以下学生と略）65名（男性44名、女性21名）、神奈川県県立高校の教員5名（男性4名、女性1名）の計72名である。調査対象者は本学学生85名（硬式テニス部（テニス部と略す）男性23名、アメリカンフットボール部（アメフト部と略）男性35名、陸上競技部（陸上部と略）男性4名、女性1名、硬式野球部（野球部と略す）男性5名、剣道部男性9名、女性2名、部活動非所属者男性4名、女性4名、計男性78名、女性7名）である。調査内容は、活動量（かなりハード⇔ソフトの5段階）、主観（快適感、温霊感、湿潤感、べとつき感、蒸れ感各々5段階）、警報メールの配信内容と主観の一致度（主観よりも低い⇔主観よりも高いの5段階）、水分補給の頻度（5段階）、活動場所（屋内・屋外）、着衣量を共通項目にし、運動者には、活動時間、着衣の素材、休憩の頻度を追加で調査した。基本、質問項目は5件法で回答させた。

結果と考察：

アンケート調査結果；調査回答対象者は運動部が非運動者の10倍以上多い延べ347人、性別については、男子が女子の約10倍の延べ338人であった。所属部活はテニス部が延べ172人と最も多かった。4か月間の回答者の述べ人数は373人であった。回答の多い活動月は、8月が161人と最多、次いで7月が140人だった。活動開始時刻は16時が140人と最多、次いで朝8時が107人だった。本配信において、16時に定時のメール配信をしたことが妥当だったといえる。活動時間については、4時間以上が161人と最多で、一度部活を始めると4時間以上の長時間、活動が実施されている実態が明らかとなった。活動量の所属毎の特徴を以下に記す。活動量については、テニス部とアメフト部は“かなりハード”、“ややハード”がほとんどで、野球部と剣道部でも“ややハード”に最も多く回答しており、運動量が多いことが明らかとなった。陸上部では、“かなりハード”から“ソフト”までばらつきが多かった。部活動非所属者では“かなりハード”の回答者はなく、“普通”という回答が最も多かった。着衣量の所属毎の特徴をFig.3の着衣の組合せ回答割合、Fig.4の附属品の着用状況により4か月の合計回答数で示す。

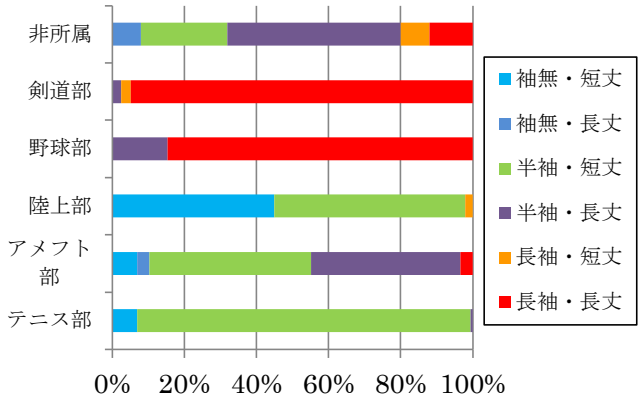


Fig.3 所属毎の着衣の上下の組合せの回答割合

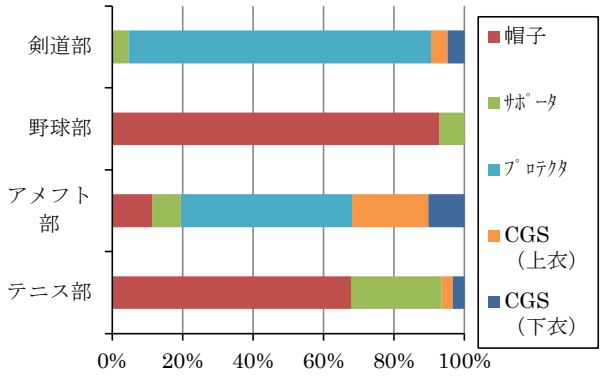


Fig.4 所属毎の附属品の着用状況

着衣の組み合わせではテニス部、陸上部では、“半袖・短丈”が最多だが、陸上部では“袖無・短丈”とさらに軽装も同数近く回答があった。アメフト部は、“半袖・短丈”が最多で、“半袖・長丈”が次い

で多かった。剣道部と野球部は“長袖・長丈”という回答が最多で、暑熱環境でも全身を覆う被覆面積が多い着衣形態であることが明確となった。剣道部や野球部では剣道着や野球のユニフォームを着用していたことが推察できる。部活動非所属者については、“半袖・長丈”が最多で、次いで“半袖・短丈”であった。Fig.4 より附属品に関しては剣道部、ついでアメフト部でプロテクタ（防具）の回答が多かった。剣道部では、剣道着という被覆面積の多い着衣の上にさらに防具を着用していることが明らかとなり、暑熱環境下であっても、着衣量が多いことが確認できた。アメフト部でも基本・着衣の下に CGS を、上にプロテクタ（防具）を着用していることがうかがえ、これらの部活では被覆面積が多いのに加え、重ね着による暑熱負荷が多いことが確認できた。テニス部と野球部においては帽子の着用が最多で日射対策がなされていた。一方、陸上部では帽子を含め附属品の着用回答者がいなかった。屋外のスポーツでも所属により慣習が異なると推定される。身体密着型の衣服である CGS は上衣、下衣とも被覆面積が大きく多量の汗をかくアメフト部が最多で、次いで剣道部が多く、テニス部でも若干着用されていた。汗処理として CGS が期待されていることが推察される。

素材については、野球部以外は部活動の所属、非所属に関係なく“上下とも合繊”という回答が最多であった。アメフト部と野球部では、“上下とも合繊”と“上衣が合繊で下衣が天然”という回答もあり、特に野球部では“上下とも合繊”と同数であった。また、剣道部においては、6 月と 7 月において“上下とも天然”という回答があり、少数ではあるが暑熱環境下に練習着として伝統的な綿の剣道着を上下着用している実態がうかがえた。

主観申告の 1 つである快適感について、月毎の特徴を Fig.5 に、所属毎の特徴を Fig.6 に示す。

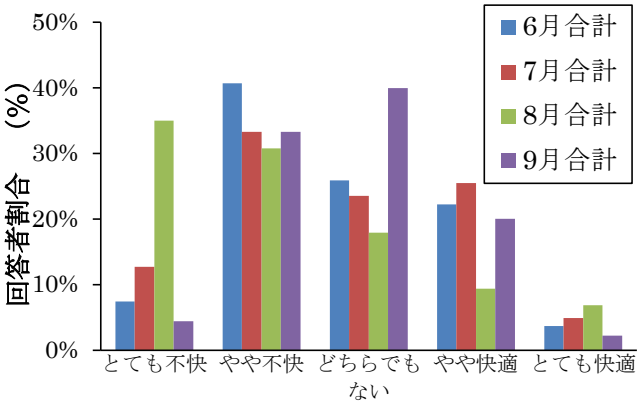


Fig.5 月ごとの不快感申告の回答割合の推移

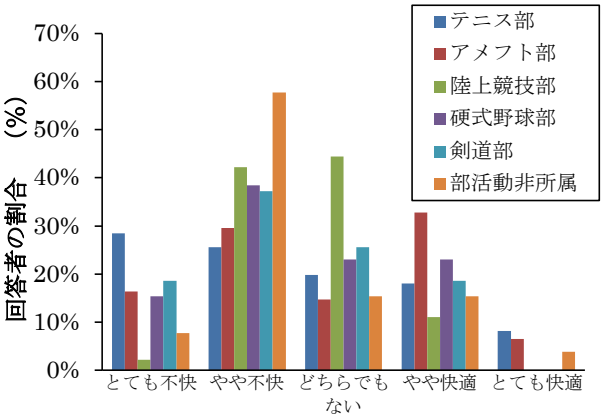


Fig. 6 所属ごとの不快感申告の回答割合

6 月から 7 月には“とても不快”が漸増するが 10%前後であるが、8 月に一気に“とても不快”が 35%まで増加する。9 月になると“とても不快”が 5%を切り、“やや快適”が増加する（Fig.5）。所属で比較すると、テニス部、アメフト部、野球部、剣道部が“とても不快”の回答割合が多い（Fig.6）。

夏季の WBGT の平均値と各部活場所の温熱環境の特徴；4 か月間の回答対象となった WBGT の平均値を Fig.7 に示す。また、晴れの日の各活動場所の黒球温の変化を Fig.8 に示す。

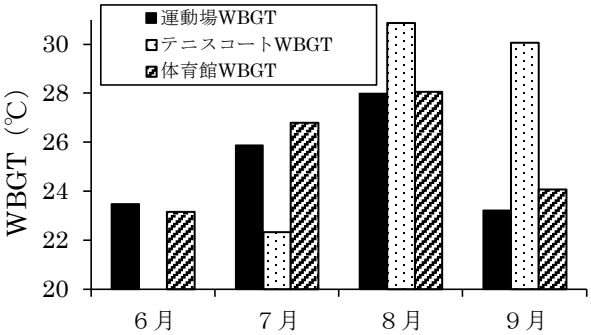


Fig.7 夏季の WBGT 平均値

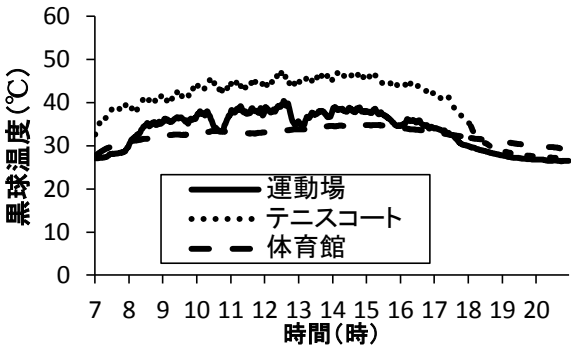


Fig.8 晴れの日の各活動場所の黒球温度の変化

各活動場所ともに 8 月まで WBGT は上昇し、9 月になると下降した。また、運動場と体育館の回答対

象となったWBGTの平均値はほぼ同値だが、テニスコートは7月では他の2つよりも低値であったが、8月、9月は高値を示した（Fig.7）。晴れの日のテニスコートの黒球温は早朝から日が沈む18時ころまで他の場所よりも最大7℃位、顕著に高い（Fig.8）。これは、テニスコート（ハードコート）の地面による日射の照り返しの効果と考えられる。一方、日が沈んだ18時以降は、体育館の黒球温が高く維持される。よって夕方以降の部活動では体育館の温熱負荷も大きくなる。

水分補給の頻度；着衣の被覆面積が高く、活動量も高いと思われるアメフト部において、全ての回答において水分補給が30分より頻度が高い5と回答していた。次いで、テニス部、陸上部、野球部、剣道部においても中央値は“30分に1度”の4であり、テニス部、野球部、剣道部では回答の25%が“30分よりも頻度が高い”との間に回答がされていることが明らかとなった。また、非所属者は中央値が“1時間に1度”であり、運動者よりも水分補給頻度が少なく、回答者の25%が1時間から2時間の間に水分補給を行っていることが明らかとなった。

休憩の頻度；休憩の頻度では、最も頻繁に水分補給をしていたアメフト部が全ての回答において“2時間に1度以上”と回答していたため、中央値も1と最も少なく、次に陸上競技部と剣道部の中央値が“1時間に1度”、テニス部と野球部では中央値が“30分に1度程度”で休憩を頻繁にとっていた。

警報メールと主観との関係；配信された警報メールと主観との関係の結果をFig.9に示す。

5段階の回答の5は“かなり主観より警告レベルが厳しい”で1は“かなり主観よりも警告レベルが低い”とする回答であるが、どの部活および部活動非所属者も“主観とあった評価であった”と回答する3に中央値が位置し、概ね、主観と一致していると評価していた。しかし、テニス部と剣道部において、回答の25%が“主観とあった評価であった”と“やや主観よりも警告レベルが低い評価であった”とする間にばらついており、主観よりも警告レベルが過小評価であったと評価する傾向が見られた。これらのことから、暑熱環境の厳しい場所で活動量も多い者や、被覆面積の多い着衣を着用している者には現状の WBGT を用いた警報配信システムでは主観と一致しないことが明らかとなった。

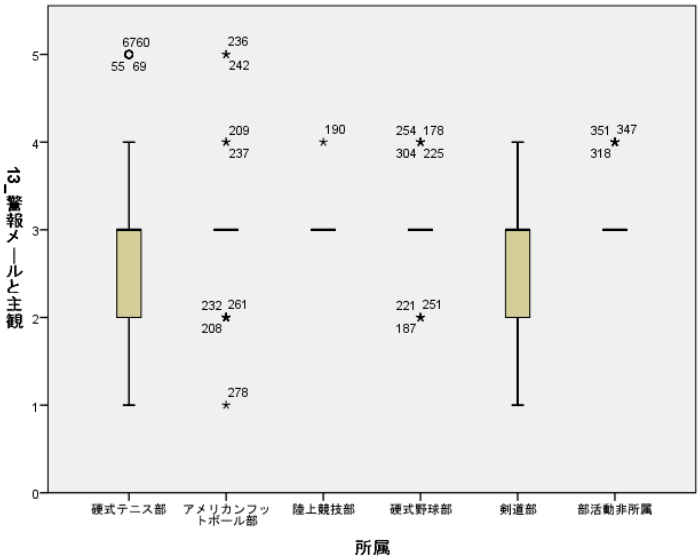


Fig.9 所属毎の配信警報メールと主観との関係

現状の警報システムは環境のデータのみから温熱環境指標を予測しており警報レベルの運動指針としては、不十分と予想される。そこで、今後、BAN無線システムにより得られる人体側の生理データと組み合わせて被験者の個別の状況に応じて熱中症への移行状態の早期把握と、その予防システムの構築をめざす。

(3)暑熱環境下の陸上競技用Tシャツのデザインの工夫による熱中症予防効果の検証

目的：暑熱環境下のスポーツ時には、熱中症が毎年多数報告されている。屋外競技で陸上競技用のTシャツは比較的被覆面積が小さく軽装で他のスポーツと比較して不快感は小さいが（Fig.6）、このようなウエアであっても過酷な暑熱環境では、熱中症が生じる危険性がある。すでに素材や被覆面積を減らすデザインの工夫による改良には限界がある。そこで、熱中症対策として有効なデザインの工夫として、ふいご作用が生じやすいように工夫されたものを共同研究のM社が開発した。そこで、本研究では、このウエアのふいご作用が運動時に本当に効果があるのか、コインの有無で比較することで検証し、さらに暑熱環境下でのコインの有無というデザイン効果の違いによる温熱負荷の違いが人体生理に与える影響を評価し、暑熱環境下における熱中症予防に適したウエアとしてふいごTシャツが妥当であるか検討することを目的とする。

方法：コインの有無による効果を比較するため、①動作解析実験、②人工気候室における換気実験、③フィールド実験を行った。本実験で検討する着衣について Fig.10 に示す。ウエアの背部のウエストの高さにコインが入るポケットが設置されており、このコインにより動作時のウエアの揺動が増幅され、ふいご作用がより起きやすくなり、放熱効果が高くなるとうたわれている。KES による材料物性実験により計測した着衣試料の諸元について Table1 に示す。比較のため昨年度実験した CGS(BA)の値も示す。CGS と比較して厚みが若干薄いが、熱抵抗、通気抵抗は同程度である。

Fig10 ふいごＴシャツを着用した様子

実験手順：

動作解析実験：動作解析ソフト（キッセイコムテック㈱、型式：KC-1HICam-Sys）を用いて、コインを入れる位置に動作解析用のポイントマーカをつけ、トレッドミルによる走行(10km/h)を約 30 秒間行い、コイン有･無の 2 条件で、各々マーカの軌跡を 3 次元で計測する。被験者は 1 名である。走行位置による誤差が生じ垂直方向の揺れをみる z 軸を取り上げ、z 軸の 30 秒の周期的な軌跡の周期を合わせて平均化したものを比較検討する。

Table1 実験着の諸元

測定項目	T-shirt	CGS
厚さ d（mm）	0.40	0.47
熱伝導率 λ（W/m/K）	0.04	0.06
熱抵抗値 d/λ（K・m²/W）	0.010	0.008
通気抵抗（kPa・s /m）	0.01	0.01
接触冷温感(W/cm²)	0.10	0.15

換気実験：被験者は横浜国立大学学生 9 名でうち 4 名が体育会陸上部男子部員で年齢 21.3±0.8（歳）、身長 177.0±5.5（cm）、体重 60.0±3.7（kg）、BMI19.0±1.4、体表面積 1.74 ±0.07（cm^2）である。本実験は、2013 年 5 月上旬から 6 月下旬にかけて、本学の人工気候室で温度 20℃、湿度 65％RH に設定してトレーサガス法を用いて行った。被験者は実験開始約 30 分前に実験室に来室、人工気候室に入室した。上半身裸体にガスを通すチューブ（前面躯体部，背面躯体部に Inlet・Outlet 各々チューブを 8 本ずつ）を装着した後、Ｔシャツを着用し、トレーサガスとして炭酸ガスを流し（流量は一定になるように制御されている）、実験を開始した。実験は、トレッドミルによる走行(10km/h)を 10 分間行い、Inlet/Outlet の CO_2 濃度を各 5 分ずつ測定し、走行終了後、座位にて安静を 5 分間とり、その間に Background の測定をした。なお、実験で得られた数値は式（1）によって換気速度を算出した。

$$\mathrm{VENT} = v \times \frac{CO_{2_{inlet}} - CO_{2_{outlet}}}{CO_{2_{outlet}} - CO_{2_{backgound}}} \cdot\cdot\cdot\cdot\cdot\cdot\cdot (1)$$

ここで VENT：換気速度(l/min)、$CO_{2_{inlet}}$：着衣に入れる炭酸ガス濃度(ppm)、$CO_{2_{outlet}}$：サンプリングチューブに戻る炭酸ガス濃度(ppm)、$CO_{2_{backgound}}$：環境の炭酸ガス濃度、V：チューブ内の流量(l/min)

また、温熱的快適性評価のための温熱生理計測の評価項目を厳選し、本実験ではトレーサガス法実験と並行して 5cm×5cm の熱流計センサ (型式:M55A／江藤電気社製)を 2 箇所（胸部および背中下部）に貼付し、データロガ (型式：THERMIC MODEL 2300A／江藤電気社製)で 1 秒毎に連続測定し収録した。各センサの取り付け位置を Fig.11 に示す。なお、熱流計センサで計測した皮膚温、放熱量および環境温を用い、式（2）より熱通過率h_tを算出した。

$$h_t = \frac{q}{T_s - T_e} \cdot\cdot\cdot\cdot\cdot\cdot\cdot (2)$$

ここで

h_t：熱通過率(W/m²/℃)、q：放熱量(W/m²)

T_s：皮膚温(℃)、 T_e：環境温(℃)

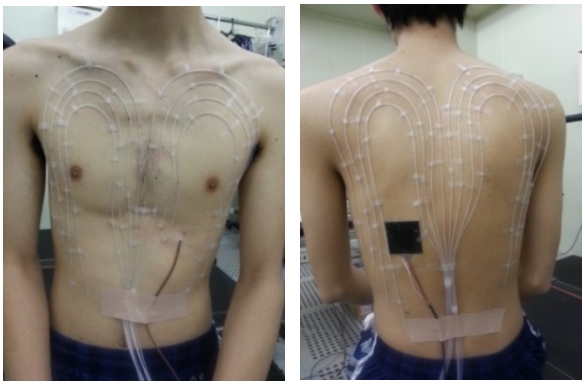


Fig11 換気実験のセンサの取り付け位置

フィールド実験：本実験では、屋外のため、太陽光の輻射を考慮し、換気実験で用いた地色が紺色から白色に変えた。紺色と白色の日射特性の違いについては、EKO MR-60 および EKO MS-602 を用いて計測を行った。計測結果を Table2 に示す。白色ウエアの反射率が 20%大きく、吸収率が 25.8%小さく、透過率も 5.8%大きいため日射を遮蔽する素材であることが分かる。

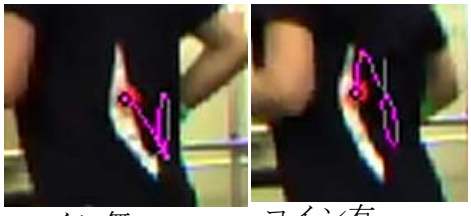
Table2 ウエアの輻射特性

ウエアの色	反射率	吸収率	透過率
白色	35.4	51.0	13.6
紺色	15.4	76.8	7.8

被験者は横浜国立大学体育会陸上部男子部員 8 名で年齢 20.6±1.2（歳）、身長 173.9±5.6（cm）、体重 58.1±3.1（kg）、BMI19.2±0.9、体表面積 1.72±0.03（cm^2）である。被験者は実験開始約 30 分前に本学運動場横の管理棟 3 階の控え室に入室した。上半身裸体、裸足の状態で体重計測の後、直腸温の挿入を行った。その後、口腔温を計測しながら、各センサ（皮膚温付熱流計 3 点、（胸、背中上、背中下）, 衣服内温湿度計 2 点（胸と背中）、皮膚温計 4 点（胸、上腕、大腿、下腿）、左耳孔内温度計、直腸温計、心拍計、運動強度）を貼付、装着した。熱流計は皮膚温内蔵型で 1cm×1cm の小型熱流計（型式：S11A）を用いた。衣服内湿度、皮膚温、耳孔内温は本プロジェクトで開発した無線温度センサ付きロガで計測した。データは 10 秒毎にロガに収録した。直腸温は、有線温湿度センサ付きロガ（型式:LT-8A／グラム(株)製）を使用した。心拍計はトレーニングコンピュータ（型式:RS800CX／Polar Electro 社製）を使用した。センサの取り付け位置を Fig.12 に示す。実験着を着用し、主観申告（温冷感、湿潤感、快適感、べとつき感、蒸れ感の 5 項目）を行った後、各センサ取り付け後、200ml のスポーツドリンクを飲み、実験着に着替えた後、26℃に設定した控室にて約 10 分間安静にした。キャンパス内の運動場へと移動し、20 分間ランニングを行った後、運動場内の木陰に移動し、椅座位安静で回復期の計測を 15 分間行った。この間、掻いた汗は随時タオルでふき取り素早く密閉できる袋にタオルを戻した。なお、15 分間の回復期が終わったところで、各センサの測定を切り、その後再び控室に戻り、口腔温を計測しながら直腸温を含む各センサを脱却した。その後、上半身裸体、裸足の状態で体重計測を行い、必要量のスポーツドリンクを飲用してもらった。実験のタイムテーブルを Table3 に、実験の様子を Fig.13 に示す。

Fig.12 センサの取り付け位置

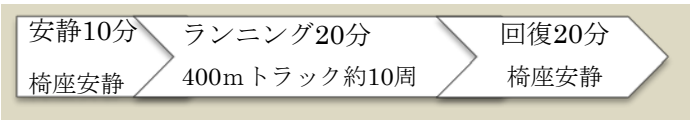
Fig.13 被験者ランニングの様子



コイン無　コイン有

Fig.14 コイン部の移動軌跡

Table3 フィールド実験のタイムテーブル（●主観申告）



● ● ●　● ● ● ● ●　● ● ● ●

結果：①動作解析実験結果：着衣の走行動作時のコイン位置の移動軌跡を拡大して Fig.14 に示す。コイン有の方が垂直方向の揺れの振幅が大きいことがわかる。そこでマーカの軌跡の周期的な Z 軸方向（垂直方向）の変位を周期を合わせた移動平均を Fig.15 に示す。コイン有の方が、コイン無よりも 0.1%水準で有意に揺れが増幅しており、これらのことから、コインの重さによって、コインを入れない時に比べて、ウエアの揺れが増幅していることが確認できた。

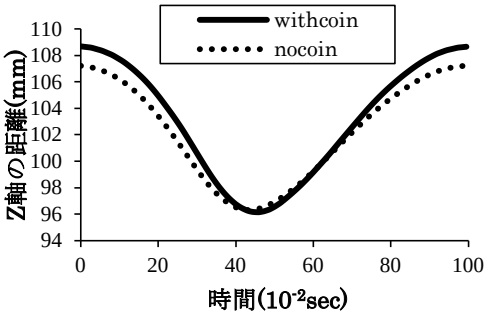


Fig.15 コインによる垂直方向揺動増幅
$p<.001$ で有意差有

②**換気実験結果：**着衣の換気量を表す換気速度の 9 人の被験者の平均値の結果を Fig.16 に示す。コイン有の方が 5%水準で有意に大きな値を示し、コインを入れることにより換気量が増加することが明らかになった。また、熱流を計測した胸と背中下で、胸においてもコイン有の方が大きかったものの、有意差は見られなかった。しかし、背中下において 1%水準で有意にコインを入れた時の方が熱通過率が増加することが明らかになった（Fig.17）。

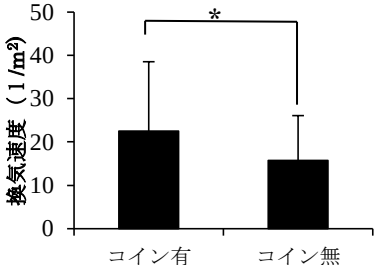


Fig.16 コインによる換気速度増加
*：$p<.05$（N=9）

③**フィールド実験結果**：計測した 3 箇所のうち、背中上の熱通過率の結果を Fig.18 に示す。

胸と背中下においてもコイン有の方が大きかったものの、有意差は見られなかったが、背中上において、人工気候室実験同様、5%水準で有意にコインを入れない時よりも、コインを入れた時の方が、熱通過率が増加し、熱が逃げやすくなることが明らかになった。総発汗量は、有意差はなかったがコインを入れた時の方が、総発汗量は少なかった。コインのふいご作用で若干、温熱負荷が軽減されたことが示唆された。

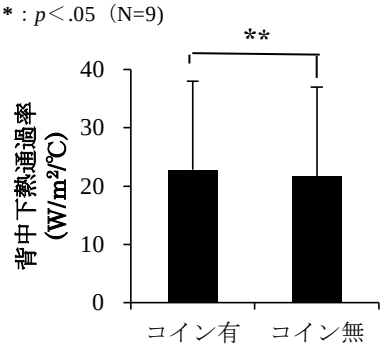


Fig.17 コインによる熱通過率増加
**：$p<.01$（N=9）

胸の衣服内温度の計測結果を Fig.19 に示す。胸の衣服内温度では、安静時と、コインの揺れによるふいご効果が期待できる走行時に、コイン有の時の方が、0.1%水準で有意に低値を示した。しかし、回復時には逆転した。動作時には冷却効果があるものの、動作がない時の冷却効果の持続性には課題があることが明らかとなった。一方、背中上の衣服内温度においては、ばらつきは大きいが、安静時と回復時でコインを入れない時よりも、コインを入れた時の方が、0.1%水準で有意に低値を示した。しかし、胸とは逆にコインの揺れによるふいご効果が期待できる走行時にはコイン有の時よりもコイン無の時の方が、0.1～1%水準で有意に低値を示した。これは、衣服内の温められた空気が上昇する際にコインの揺れによって増幅され、背中上の衣服内温度が上昇したのではないかと考える。衣服内湿度はフィールドでの厳しい暑熱環境下での実験であったため、被験者の大量の汗と、フィールドでの無線センサの受信状況の限界で、欠損値が多く、胸の衣服内湿度については､安静と走行の 30 分間のデータ、背中上の衣服内室度においては安静時のみの計測となった。

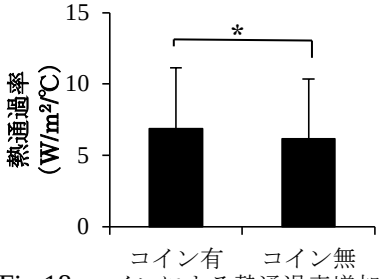


Fig.18 コインによる熱通過率増加
*：$p<.05$（N=6）(フィールド実験)

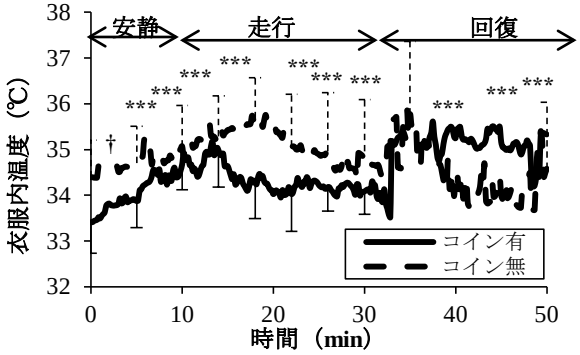


Fig.19 コインの有無が胸の衣服内温度におよぼす効果
†：$p<.10$，***：$p<.001$

平均皮膚温においても、安静から回復まで 0.1%水準で有意にコイン有の時の方が低値を示し、特に回復期にはその差が大きく広がっており、コインによる揺れの増幅に伴うふいご効果による皮膚表面への冷却効果が見られた（Fig.20）。心拍数においても差は小さいものの、安静から回復までのほとんどにおいて 0.1%水準で有意にコイン有の時の方が低値を示し、コインによる揺れの増幅に伴うふいご効果で、温熱ストレスが軽減されたことが示唆された（Fig.21）。左耳内温は皮膚温と同様の無線センサを使用して計測しており、フィールドでの厳しい暑熱環境下での実験であったため、被験者の大量の汗と、フィールドでの無線センサの受信状況の限界で、欠損値が多く、安静と走行の 30 分間ののみの計測となった。左耳内温でも、心拍同様、差は小さいものの、走行時において、0.1%水準で有意にコイン有の時の方が、低値を示し、コインによる揺れの増幅に伴うふいご効果で、温熱ストレスが軽減されたことが示唆された（Fig.22）。

一方、直腸温においては、安静から回復まで全体を通して、コインを入れた時よりも、コインを入れない時の方が、低い値を示すという逆転がおきた。また、安静時の後半5分間と回復時の35分～40分間の間に5%水準で有意差も認められた（Fig.23）。

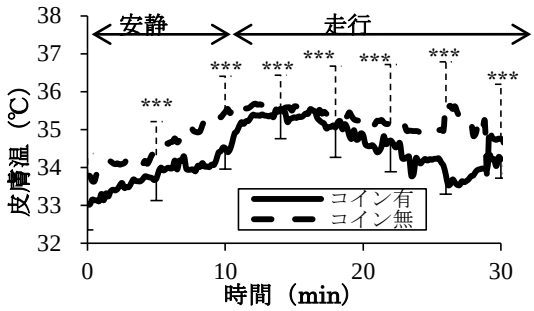


Fig.20 コインの有無が平均皮膚温におよぼす効果
*** : $p<.001$

まとめと今後の課題

現行の最もメジャーな温熱物理指標である WBGT を用い、昨年度構築した熱中症予防警報システムを用いて6 月～9 月の夏季の部活動中の熱中症予防のためにWBGT を元にした警報メール配信とともに毎日の部活動の活動レベルや着衣状況等の調査を実施し、現行の熱中症予防システムが環境把握・改善に寄与するか、効果と課題について検討した。その結果、現状の警報システムで客観的に毎日の部活動中の温熱負荷を示すことで熱中症予防の効果は得られたが、環境のデータのみから温熱環境指標を予測しており着衣量が多い、あるいは活動量多い、日射の照り返しが激しい部活動では警報レベルの運動指針としては、過小評価と評価するものもいた。そこで、今後、BAN無線システムにより得られる人体側の生理データと組み合わせて被験者の個別の状況に応じて熱中症への移行状態の早期把握と、その予防システムの構築をめざす。

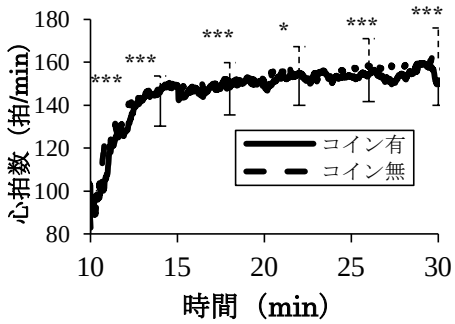


Fig.21 コインの有無が走行中の心拍数におよぼす効果，* : $p<.05$、*** : $p<.001$

暑熱環境下でのコインの有無というデザイン効果の違いによる温熱負荷の違いが人体生理に与える影響を評価し、暑熱環境下における熱中症予防に適したウエアとしてふいごTシャツが妥当であるか検討した。動作解析実験により、コインを入れるとコインを入れない時に比べて、ウエアの揺れが増幅していることが確認できた。換気および熱通過率を計測する人工気候室実験により、コインを入れることで、コインを入れない時よりも、換気速度、熱通過率ともに増加し、コインによるふいご効果の増幅という着衣条件の工夫が換気量および熱の逃げやすさを表す熱通過率の促進に貢献することが明らかとなった。そして、フィールド実験により、実際のフィールドで使用した際にも、熱通過率が増加し、胸と背中上の衣服内温湿度と平均皮膚温についても、コインを入れることで、有意に低値を示した。このことから、コインを入れることで、ふいご作用の増幅による放熱の促進に貢献することが明らかとなった。また、心拍数、左耳内温といった身体深部へも有意な冷却効果があったものの、直腸温では逆転が起き、コインによるふいご効果は局所的な冷却には皮膚温等に一定の効果がみられるものの、深部温を冷却し主観に正の効果をもたらすまでは至っていないことがうかがえ、課題が浮き彫りとなった。

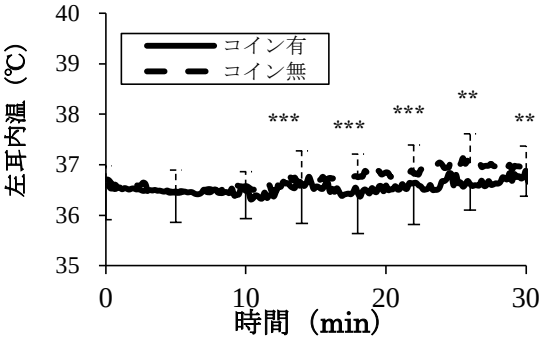


Fig.22 コインの有無が耳孔内温におよぼす効果
** : $p<.01$、*** : $p<.001$

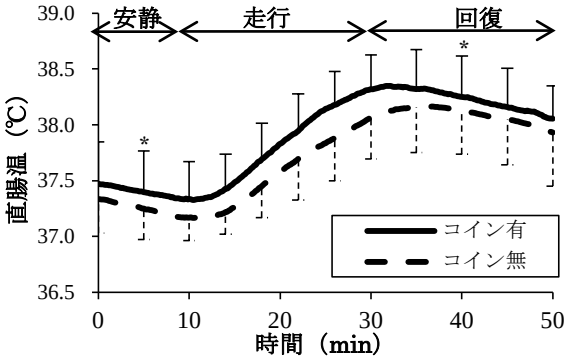


Fig.23 コインの有無が直腸温におよぼす効果, * : $p<.05$

【引用・参考文献】

中田いずみ，衣服の着心地に関わる教育プログラムの開発をめざした研究，2013 年度修士論文

４．発表論文・特許等

【論文】

（１） 薩本弥生，川村友希，杉本千佳：暑熱環境下で熱中症予防に適した剣道用稽古着の検討服装と熱中症，繊維製品消費科学会，**54**（**3**）,20-30,2013.

（２） 薩本弥生、子供の体温と衣服～熱中症から体を守る～、特集「子どもの成長と衣服」、チャイルドヘルス、(株)診断と治療社、**17**，16-19,2014.

（３） 田中英登，熱中症予防のための暑熱順化の意義，発汗学，20(2): 88-91, 2013.

（４） Chika Sugimoto, Human Sensing Using Wearable Wireless Sensors for Smart Environments, Proc. of the 7th International Conference on Sensing Technology (ICST2013), S4C, New Zealand, Dec. 2013.

（５） R. Thapa Chhetri, I. Suzuki, J. Takezaki, H. Tabusa H., M. Takeda , and J. Koizumi, “Bacterial diversity in biological filtration plant for the removal of iron and manganese from groundwater, ” J. Water Environ. Tecnol., vol.11, no.1, pp. 33-47, 2013.

（６） K. Kondo, T. Umezu, S, Shimura, R. Narizuka, J. Koizumi, T. Mashima, M. Katahira, M. Takeda, "Structure of perosamine-containing polysaccharide, a component of the sheath of *Thiothrix fructosivorans*," Int. J. Biol. Macromol., vol.59, pp. 59-66, Aug. 2013.

（７） H. Fujii, H. Koyama, S. Fukuda, H. Tokai, S. Tajima, J. Koizumi, K. Yamaguti, H. Kuratsune, Y. Watanabe, Y. Hirayama, T. Shoji, M. Inaba, Y. Nishizawa, "Autonomic Function is Associated With Health-Related Quality of Life in Patients With End-Stage Renal Disease: A Case-Control Study," J. Renal Nutrition, vol.23, pp. 340-347, Sep. 2013.

（８） M. Yabe, T. Tamaki, M, Takeda, J. Koizumi, K. Ueda, "Distributed processing method on the calculation for the search of all solution – Development of the distributed processing system IPDP–," Journal of Computer Chemistry, Japan, vol.12 (3), pp. 172-180, Sep. 2013.

【学会発表】

（１） 香川利春，薩本弥生，島崎康弘，竹内正顕，高山清隆，空気圧を用いた靴の換気計測用模擬歩行装置, 日本フルードパワーシステム学会 25 年度春季フルードパワーシステム講演会, 東京，No.5，2013.

（２） 薩本弥生，田中唯，中田いずみ，島崎康弘，暑熱環境下における熱中症予防に適したコンプレッションインターの検討，日本繊維製品消費科学会 2013 年度年次大会，名古屋，C8，2013.

（３） 薩本弥生、劉雨，青柳卓也，上野哲、着衣の熱移動性や換気性能に素材の物性やデザインがおよぼす効果，第 37 回人間生活環境系学会シンポジウム（HES)､神戸，2013.

（４） 榎本ヒカル，薩本弥生，杉本千佳，あるクールビズ実施オフィスの温熱環境による人体影響に関する実態測定，第 37 回人間生活環境系学会シンポジウム(HES)､神戸，2013.

【特許登録】小泉淳一：自律神経機能年齢の判定システム及び判定方法，登録番号　特許第 5455071 号，登録日　2014 年 1 月 17 日

【主要な招待講演・招待論文】

（１） 第 45 回快適性を考えるシンポジウム～「健やか・爽やかなエイジングと衣服」,企画、運営，平成 25 年 4 月 26 日，京都市産業技術研究所，京都，繊消快適（委）主催，繊維製品消費科学会快適・健康研究委員会主催

（２） 第 46 回快適性を考えるシンポジウム，「着衣の温熱的快適性にかかわるモデリング」,企画運営，平成 25 年 10 月 25 日，キャンパスプラザ京都，京都，繊消快適（委）主催，繊維製品消費科学会快適・健康研究委員会主催

（３） 「熱中症予防と服装の関わりを考えるー猛暑・節電の夏を乗り切るためには」：薩本弥生，平成 25 年 8 月 4 日，横浜国立大学公開講座

【その他】科学研究費基盤研究 A 継続（薩本弥生、河野隆二、田中英登、杉本千佳ほか）「無線通信による熱中症予防支援システムの構築と被服環境デザインの最適化」の研究を継続中.

５．報道記事等

(1)　薩本弥生，就寝時の寝衣の機能性に関して解説， ZIP 出演，(株)日本テレビ，1 月 10 日，2013

(2)　薩本弥生，首都圏ネットワークに出演，下着に必要な性能に関する実験協力および解説,NHK,2013 年 8 月.

(3)　田中英登，『猛暑を乗り切る熱中症対策』，(株)日本テレビ世界一受けたい授業出演，8 月 17 日，2013