

湿度センサを用いた 簡易的な発汗センシング手法の実験と評価

横田 知樹¹ 近藤 亮磨¹ 岩井 将行^{1,2}

概要：猛暑環境下での発汗による脱水症状や、寒冷環境下での発汗放置による体温低下のリスクのある労働現場において、簡易的な発汗センシングが普及することは、より細やかな労働者の体調管理や作業環境の改善の一つの解決策である。一方、既存の発汗センシング技術は、大規模であったり、高コストという理由から、これらの用途に適していない。本研究では、衣服の内側に湿度センサを装着し、発汗による衣服内の湿度上昇を計測することによって発汗のセンシングを行う、簡易的な手法を提案する。これを「簡易湿度センサ手法」と呼ぶ。この手法を用いた発汗推定に関する実験とその評価の結果について報告する。

A Perspiration Sensing System using Simple Humidity Sensors

TOMOKI YOKOTA¹ RYOMA KONDO¹ MASAYUKI IWAI^{1,2}

1. はじめに

2020年のオリンピックに向けた建築需要の増大に伴い、労働者需要が増加する。それにより、労働環境の悪化が懸念される。具体的には、急激な労働者の増加により、現場の管理が行き届かなくなり、真夏の猛暑作業時の熱中症の危険や、真冬の作業時は不快感が高まり、集中力や体温の低下による事故の増加や体調を損なう危険があると考えられる。しかし、既存の発汗センシングの手法はその用途に適していると言いがたい。そこで、モバイルセンシング分野に適した発汗センシング手法があることで、より細やかな労働者の体調管理や作業環境の改善ができ、これらのリスクを軽減できる。

従来の発汗計測手法は、乾燥空気による空気循環の制御を行う手法における「装置の大掛かりさ」、乾燥剤を用いた発汗計測を行う携帯型発汗計測ロガー [1] では、乾燥剤の再利用や交換における「ランニングコストの高さ」といった点から、モバイルセンシングの分野に適していない。そ

こで我々は、乾燥空気による空気循環を用いず、湿度センサのみを用いた簡易的な発汗センサ手法を提案した。本論文では、この簡易湿度センサ手法を用いた屋内での計測実験を行い、その評価について述べる。

本論文の構成は以下の通りである。第2章では本研究の関連研究について述べ、第3章では提案手法について、第4章では実験における仮説について述べ、第5章では実験計画と実験内容、その結果について考察し述べる。第6章では本論文のまとめについて述べ、第7章では今後の課題について述べる。

2. 関連研究

文献 [2] では、ウェアラブルセンサを用いて、深部体温の時間的な変動を高精度に推定する手法を提案している。生体温熱モデルをもとにした計測手法により、活動中の計測が難しい深層部の生体情報の高精度な推定を可能にしている。また、文献 [3] では、発汗量モデルの構築により、深部体温推定の精度を高める検証をしている。発汗計測には発汗センサを用いた計測を行っているが、既存の携帯可能な発汗センサは、シリカゲルを用いた乾燥空気を作り出す手法のため、シリカゲルの交換が必要であり、ランニングコストが高い。

文献 [4] では、衣服内の湿度と温度の計測により、快適

¹ 東京電機大学 未来科学研究科 情報メディア学専攻
Tokyo Denki University, Graduate School of Science and Technology for Future Life

² 東京電機大学 未来科学部 情報メディア学科
Tokyo Denki University, School of Science and Technology for Future Life, Department of Information Systems and Multi-media Design

域のモデルが定義されている。このモデルでは、衣服内気候分野において一定以上の温度、湿度の場合は発汗を伴う発汗領域として定義されている。

そして、文献 [5] では、このモデルの完成度向上のための研究がされている。研究ではこれを定常時の衣服内温湿度と快適範囲の関係を示した衣服内の温冷感をモデルとし、衣服内気候の変化量に着目することでより精度の高い温冷感モデルについて検証している。既存のモデルが直前からの変化量について考慮されておらず、衣服内気候の絶対値のみに着目しているのに対して、5分前の衣服内気候の状態からの変化量においても温冷感が変動することに着目することで、このモデルの完成度向上を検証している。しかし、研究では衣服内気候の計測に多量のセンサノードを被験者に装着し測定しており、労働をはじめとする多様な活動をリアルタイムに計測することが難しい。

3. 提案手法

本研究で用いる「簡易湿度センサ手法」について、概要を図1に、試作したデバイスを図2に示す。また、湿度センサは Aosong Guangzhou Electronics の AM2302[6] を用いた。



図1 簡易湿度センサ手法概要

図2 試作したデバイスの図

本手法は、インナー胸部に湿度センサを装着し、肌と衣服の間の温度、湿度の変化を計測する。

本論文では、実験前後の体重変化、すなわち発汗量と、衣服内気候の変化と比較することで、発汗によって上昇する衣服内気候の変化と発汗量との相関について評価する。

4. 仮説

仮説として、衣服内湿度の時系列変化パターンを2つ挙げる。図3、図4を、それぞれパターン1、パターン2とする。

パターン1は、発汗が多い場合と少ない場合で常に湿度値に差がある場合である。この場合、発汗量の推定は計測開始時と終了時の衣服内の湿度の差で求める事が妥当だと考えられる。計算式が単純なため、センシングにかかる電

力消費が少ない。

パターン2は、発汗の立ち上がり方が発汗量毎に異なる場合である。この場合、計測開始時と終了時の衣服内の湿度の差が発汗量に依存しないため、発汗量の推定は衣服内湿度の時系列変化の積分値で求めることが妥当だと考えられる。

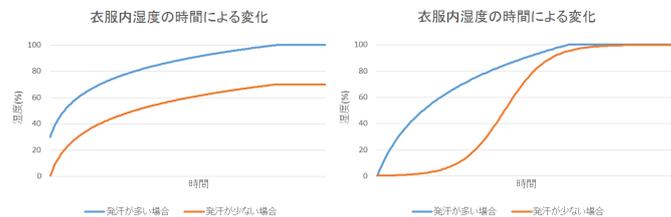


図3 湿度値に常に差がある場合 図4 立ち上がりが異なる場合

5. 実験

5.1 実験計画

前章で述べた仮説を明らかにするために、異なる発汗量での衣服内の湿度変化を計測する必要がある。

発汗量は、濱谷らの研究 [3] を参考にし、実験の前後の体重の変化を発汗量と定義する。体重の計測誤差を低減するために、3回計測を行い、平均を求めることとする。

異なる発汗量のデータを得るために複数の環境 (表1) を設定する。環境以外の発汗要因の影響を減らすために、濱谷らの研究 [3] を参考にし、15分間の一定速度でのランニングマシン運動を1回の計測として定義 (表2) する。

湿度変化の計測は、前述の簡易湿度センサ手法で行う。実験時は、センサデバイスを装着したインナーと、その上にシャツを1枚着用した。また、この手法において、風、環境気温、環境湿度は計測値に影響を与える。そのため、これらが変化する環境では衣服内の湿度変化を正しく計測できない。このことから、本実験では1回の計測毎に無風かつ環境気温、環境湿度を一定に設定する必要がある。

前田らの研究 [7] と原田らの研究 [8] を参考にし、実験毎に低温度低湿度 (20℃, 20%) および高温度低湿度 (30℃, 20%), 低温度高湿度 (20℃, 80%) に設定しそれぞれの設定で2回ずつ計測を行う。

表1 環境条件

	環境1	環境2	環境3
環境気温	20℃	30℃	20℃
環境湿度	20%	20%	80%
風	無し		

表2 運動内容

運動時間	15分
運動強度	ジョギング (時速 6km)

また、直前の計測で衣服に残った汗の影響を無くするため、1回の計測毎に着替えを行い、被験者の状態を平常に安定させるため休憩を設ける必要がある。

5.2 実験概要

前項で述べた条件を満たす、図5、図6に示す環境を制御可能な部屋を用いて実験を行った。また、被験者について表4に示し、実験は図7に示すスケジュールに基づいて行った。

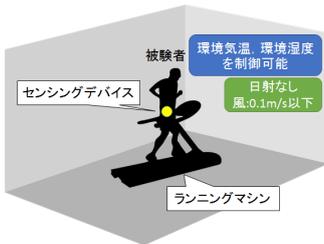


図5 実験環境の図



図6 実際の実験の様子

表3 実験環境概要

室内サイズ	2500 (W) × 4100 (D) × 2850 (H) mm
環境気温	0℃～60℃ (制御可能)
環境湿度	10%～90% (制御可能)
風	～1m/s (制御不可)

表4 被験者情報

	年齢	身長 [cm]	体重 [kg]	性別
A	22	172	76	男
B	22	171	59	男

時刻	内容	環境気温(℃)	環境湿度(%)		
11:00～11:30	装着使用方確認、テスト実験(気温20℃、湿度20%)	20	20		
11:40～11:55	実験(B)				
12:00～12:15	体重測定&データ確認→交代(着替え)5分				
12:20～12:35	実験(A)				
12:40～12:55	体重測定&データ確認→交代(着替え)5分				
13:00～13:10	データ確認、環境変更(気温を30℃に)			30	20
13:10～13:25	実験(B)				
13:30～13:45	実験(A)				
13:50～14:05	体重測定&データ確認→交代(着替え)5分				
14:10～14:25	実験(A)				
14:30～15:00	休憩、環境変更(気温を20℃、湿度を80%に)				
15:00～15:15	実験(B)				
15:20～15:35	実験(A)				
15:40～15:55	体重測定&データ確認→交代(着替え)5分				
16:15～16:20	実験(A)				
16:50	片付け、撤収				

図7 実験スケジュール

5.3 実験結果

異なる発汗量毎の衣服内の湿度変化について、被験者Aは図8に、被験者Bは図9に示す。なお、各被験者の実験において、1回ずつ、センサの装着位置を衣服外にしていたため、比較する際に注意が必要となる。

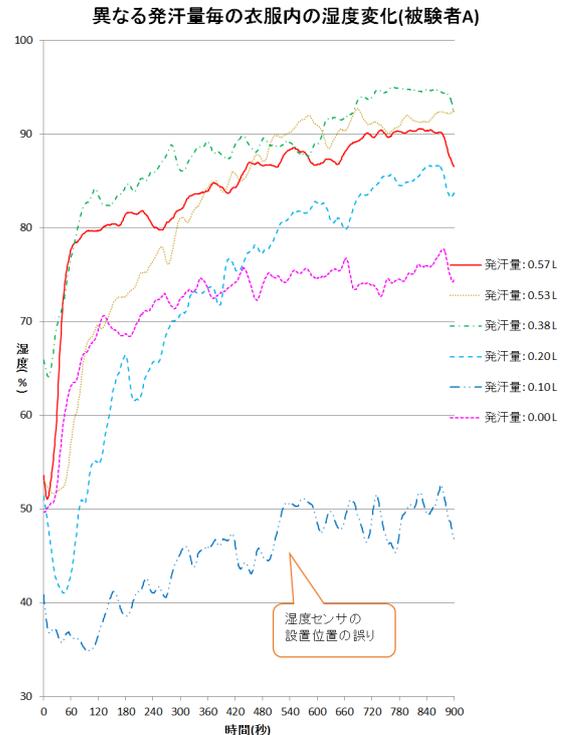


図8 異なる発汗量毎の衣服内湿度変化の比較 (被験者A)

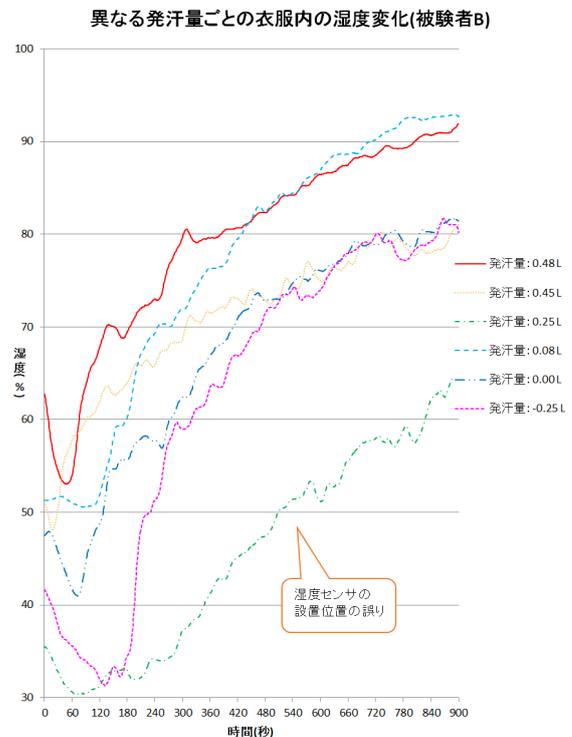


図9 異なる発汗量毎の衣服内湿度変化の比較 (被験者B)

5.4 考察

実験結果より、発汗の立ち上がり方が発汗量毎に異なるため、仮説におけるパターン2が妥当と考えられる。これに基づき、衣服内湿度の時系列変化の積分値と発汗量に相関があると考えられるため、各実験における衣服内の湿度変化の時系列データの積分値 I を式1と定義する。 h_t は時刻 t における湿度の値を示す。 I から発汗量を推定するため、 I と発汗量の相関を求め、回帰直線を得る (図10, 図11)。

相関係数が被験者Aでは0.80, 被験者Bでは0.74となり、十分な相関があると考えられ、式1は妥当であると考察する。

$$I(h_0, \dots, h_l) = \sum_{t=0}^l h_t \quad (1)$$

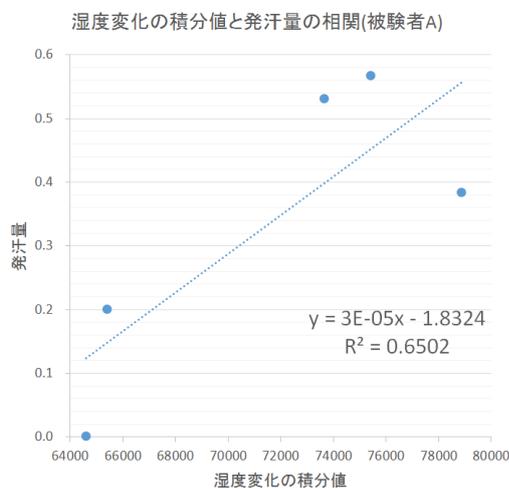


図10 各実験における衣服内湿度の時系列データの積分値と発汗量の相関 (被験者A)

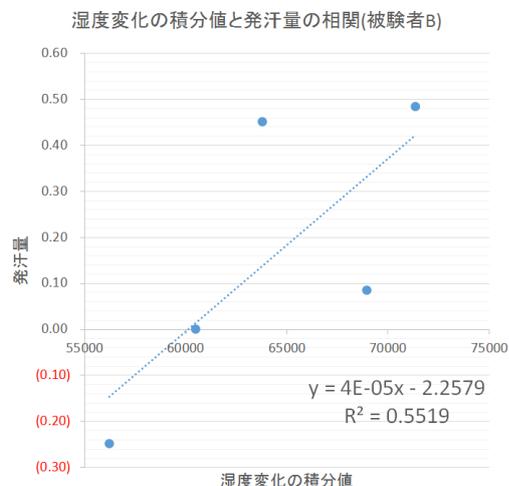


図11 各実験における衣服内湿度の時系列データの積分値と発汗量の相関 (被験者B)

発汗量が0以下となったデータが存在する原因として、体重計を設置した床が柔らかく、計測に影響を与えたためと考えられる。

6. まとめ

本論文ではまず、衣服内湿度の変化の仕方について仮説を立てた。そして、仮説を明らかにするために実験を行った。

実験の結果、衣服内の湿度の変化の仕方から、異なる発汗量における、衣服内湿度の変化の仕方を明らかにした。

そして、衣服内湿度の変化から発汗量を推定するための式を提案し、式を用いた衣服内湿度の時系列データの積分値と発汗量の相関について考察を行った。

7. 課題と今後の展望

今後の課題として下記のもの挙げられる。

計測開始時の湿度の値が異なっているため、計測開始時の差を考慮した式を検討する必要がある。

計測データに関して、現状では相関あると考えられるが、実験の試行回数が少ないため、計測データを増やし、これらの相関について精査していく必要がある。また、より多くの被験者による計測を行い、個人差を考慮したモデルを検討する必要がある。

なお、今回は指定の衣服を着用し行ったが、様々な衣服や素材について検討事項に追加する必要がある。

実験内容について、一定負荷の運動での計測であったが、運動負荷に変化のある運動や、日常における活動レベルでの計測に対して相関を調べる必要がある。また、今回は気温、湿度、風速が一定の屋内環境で行ったが、日射や風、変動する湿度や気温下での実験が必要である。

また、センサデバイスについては、計測したデータの積分の必要があるため、積分に必要な計測間隔を検討し、長時間の計測に向けて消費電力を低減する必要性がある。

今後の展望として、衣服内の空気循環制御が挙げられる。空調服等、衣服内に装着したファンをコントロールするシステムを追加することで、衣服内の環境を制御し、手法精度の向上および快適性に関する分野についても考察を行うことが挙げられる。

参考文献

- [1] テクノサイエンス株式会社：マイクロ発汗計 TPL シリーズ, <http://www.t-science.jp/doc/tpl-series.html>
- [2] 濱谷尚志, 内山彰, 東野輝夫：ウェアラブルセンサと生体温熱モデルを用いた暑熱環境下での深部体温推定の一手法, 情報処理学会論文誌, 56.10, pp.2033-2043(2015).
- [3] 濱谷尚志, 内山彰, 東野輝夫：ウェアラブルセンサを用いた発汗量推定モデルのパラメータ調整に関する一検討, 情報処理学会第76回全国大会 3, pp.2(2014).
- [4] 原田隆司, 土田和義, 丸山淳子：衣服内気候と衣服材料,

繊維機械誌, 35,350,(1982).

- [5] 久保田潤子, 秋元孝之, 橋本哲, 西野淳, 近本智行: G-63局所気流を最適制御するタスク空調システムに対する研究:(第3報) 被験者申告への新温冷感モデルの適用についての検討, 学術講演会論文集 24.3,pp.2701-2704(2012).
- [6] Aosong Guangzhou Electronics : Humidity & temp Sensor,
<http://www.aosong.com>
- [7] 前田亜紀子, 山崎和彦, 飯塚幸子, 吉田燦: 雨天想定下における作業時の衣服内気候について, 日本生気象学会雑誌, 36.2,103-111(1999).
- [8] 原田隆司, 土田和義, 衣服内気候の科学と製品設計, 繊維機械学会誌, 39.10, P361-P370 (1986).