

# 博士論文

## ウェアラブル熱中症予防デバイスシステム の提案とその有効性に関する研究

公立諏訪東京理科大学大学院

工学・マネジメント研究科 工学・マネジメント専攻

小須田 司

2021年 2月

# 目次

## 第1章

### 序論

1.1 研究背景	2
1.2 研究目的	7
1.3 本論文の構成	7
参考文献	8

## 第2章

### 熱中症と熱中症予防デバイスシステム

2.1 はじめに	10
2.2 熱中症の統計	10
2.3 熱中症の機序	13
2.3.1 人の体温調節	13
2.3.2 熱中症の機序	14
2.4 熱中症の分類	15
2.5 熱中症予防システム	16
2.5.1 従来の熱中症アラート研究	16
2.5.2 ウェアラブルな熱中症予防システム	17
2.6 現状の熱中症予防システムの課題	21
2.7 発汗計測方法	21
2.8 まとめ	28
参考文献	29

## 第3章

### ヘルメット型発汗量計測手法の確立

3.1 はじめに	32
3.2 ヘルメット型発汗計測方法の原理	32

3.3 原理検証実験	34
3.4 実験結果と考察	38
3.5 まとめ	42
参考文献	43

## 第4章

### 安静時におけるヘルメット型発汗量計測デバイスの検証

4.1 はじめに	46
4.2 実験環境の構築	46
4.3 ヒトによる基礎検証実験	48
4.4 安静時実験方法	50
4.5 実験結果と考察	53
4.5.1 単回帰分析	53
4.5.2 重回帰分析	59
4.6 まとめ	61
参考文献	62

## 第5章

### 行動時におけるヘルメット型発汗量計測デバイスの検証

5.1 はじめに	64
5.2 行動時実験方法	64
5.3 実験結果と考察	67
5.3.1 単回帰分析	67
5.3.2 重回帰分析	69
5.4 安静時と行動時の全データを用いた分析	73
5.5 まとめ	76
参考文献	77

## 第6章

### 開発したヘルメット型発汗量計測デバイスの課題対応と統合型ウェアラブル熱中症予防デバイスシステムの提案

6.1 はじめに	80
6.2 開発したヘルメット型発汗計測デバイスの課題対応	80
6.2.1 輻射熱確認実験方法	80
6.2.2 熱輻射確認実験結果および考察	81
6.3 深部体温と熱中症の関係	87
6.3.1 発汗量と深部体温の同時計測実験	87
6.3.2 深部体温と発汗量に関する既存研究	90
6.4 心拍変動（HRV）と熱中症の関係	93
6.4.1 HRVとは	93
6.4.2 HRVと熱中症に関する考察	96
6.5 塩分と熱中症の関係	98
6.5.1 塩分計測の重要性	98
6.5.2 塩分計測と熱中症に関する考察	100
6.6 統合型ウェアラブル熱中症予防デバイスシステムの提案	101
6.7 まとめ	102
参考文献	104

## 第7章

### 統合型ウェアラブル熱中症予防デバイスシステムの応用展開

7.1 はじめに	106
7.2 建設現場以外での活用現場の検討	106
7.3 発汗量計測以外の活用用途検討	109
7.4 統合型ウェアラブル労働衛生管理デバイスシステムの提案	112
7.5 学校・スポーツ分野への応用提案	114
7.6 まとめ	119
参考文献	121

第8章	
結論	123
付録	127
無線通信システムに関して	
1 最適無線方式の検討	128
1.1 建設現場の実態把握	128
1.2 最適無線方式の検討	134
2 まとめ	137
研究業績	139
謝辞	141

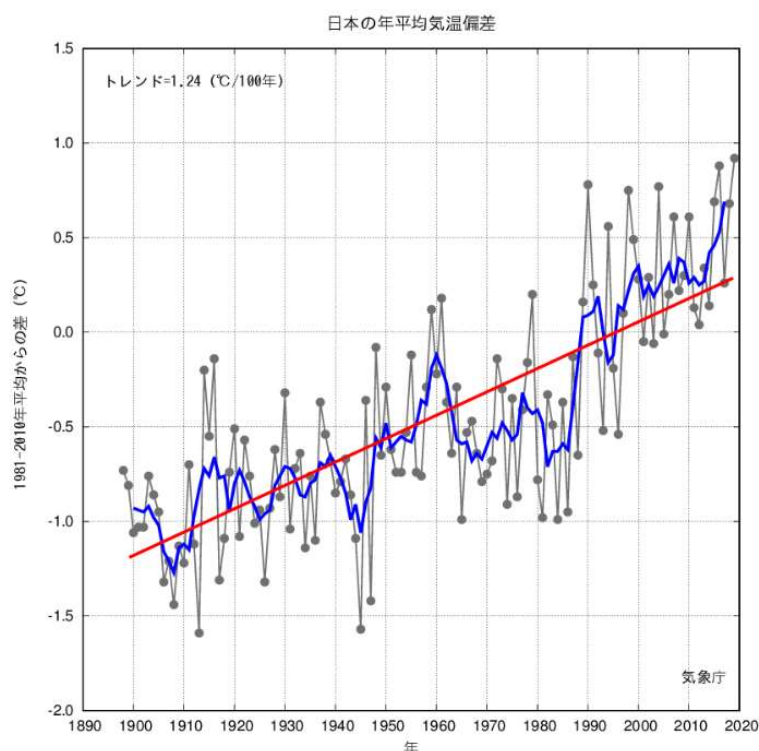


# 第一章

## 序論

## 1.1 研究背景

今般地球温暖化が加速[1]しており、日本においても年平均気温が年々上昇している。気象庁の統計[2]によると日本の平均気温は、1898年以降に100年当たりおよそ1.16°Cの割合で上昇している。特に1990年代以降には頻繁に高気温を記録するようになり、熱帯夜の日数も増加の一途をたどっている。1930年代から1940年代にかけての東京では熱帯夜の回数は年間10日以内がほとんどであったのに対し、1990年代以降では年間30~40日にまで達することも珍しくなくなってきた。



細線 (黒) : 各年の平均気温の基準値からの偏差  
太線 (青) : 偏差の5年移動平均値  
直線 (赤) : 長期変化傾向 (基準値は1981~2010年の30年平均値)

Fig.1.1.1 日本の平均気温偏差[2]

Fig.1.1.2に、日本における熱中症死亡者の年次推移を示す。Fig.1.1.1に示したように、気温の上昇に影響されてか、年々死亡者数は増加傾向にあり、熱中症対策は大きな社会問題となってきた。



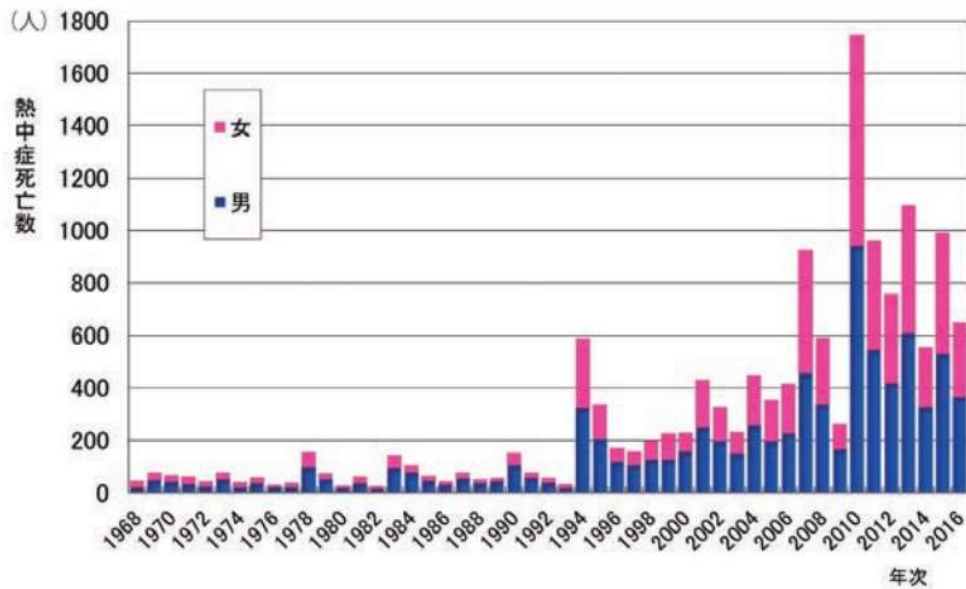


Fig.1.1.2 熱中症死亡者数の年次推移[7]

年次毎の熱中症による死亡者数を、Fig.1.1.3に示す。男性では、15～19歳（学生）、55～59歳（労働者）、80歳前後（高齢者）に、女性では80～84歳（高齢者）に熱中症発症のピークがある。健康リスクの高い高齢者の熱中症予防はもちろん重要だが、男性青年期（15才～19才）のスポーツ時の熱中症予防や、中年期（40才～60才）の労働中の熱中症予防を確実にを行い、熱中症による死亡者の低減を目指すことは、十分社会的意義があると考えられる。

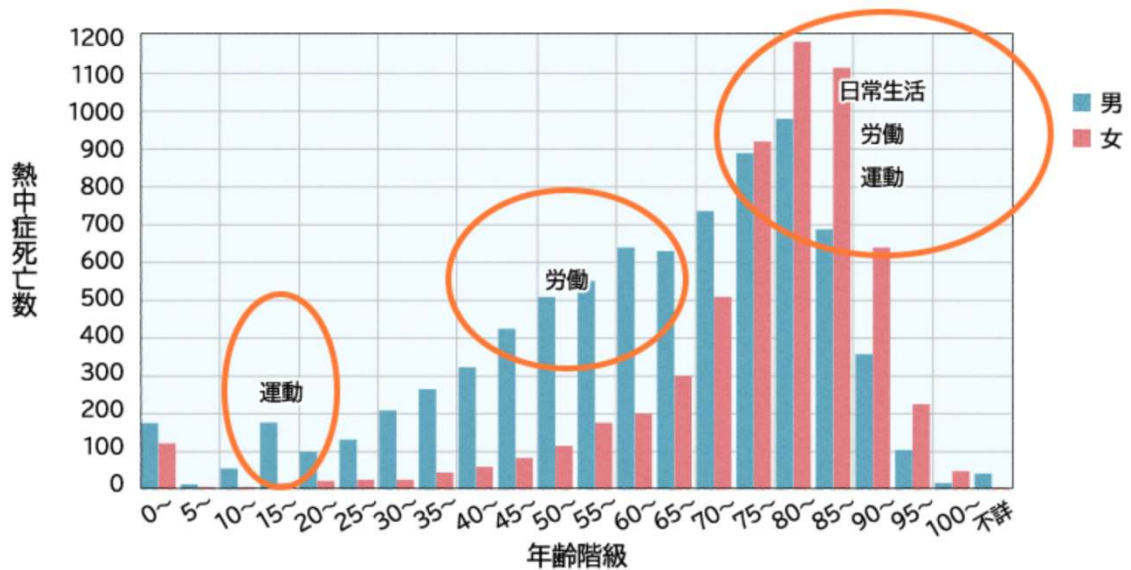


Fig.1.1.3 年齢階級別性別熱中症累積件数（1968～2015年）[7]

そこでまず、産業分野における熱中症の実態を把握する。職場における熱中症の死傷者数も、ここ10年増加傾向にあり、冷夏（平成21年）と猛暑の年（平成30年）では10倍近い死亡者が発生しており [3]、休業3日以下の疾病者数も含めればさらに100倍もの患者がいると言われている。



Fig.1.1.4 職場における熱中症死傷者数の推移[3]

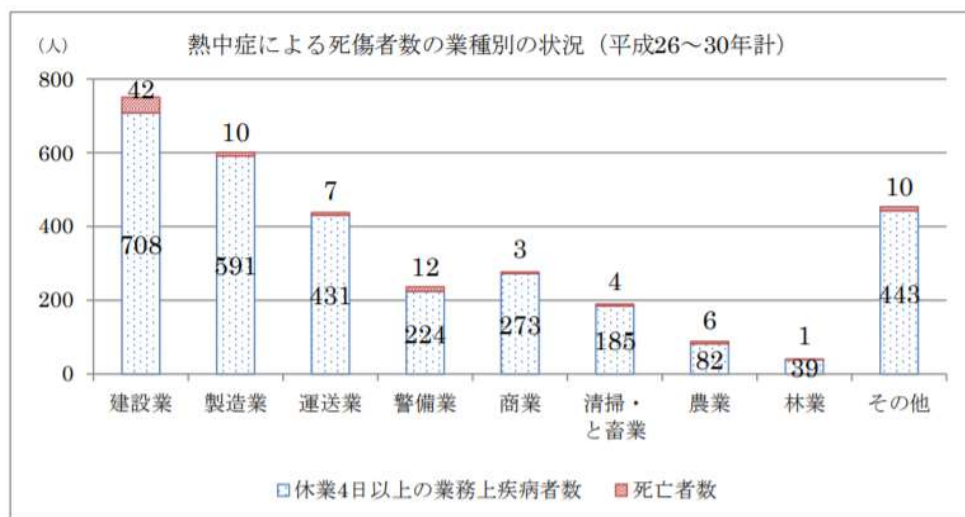


Fig.1.1.5 熱中症死傷者数の業種別の状況（平成 26～30 年計） [3]

また業種別に熱中症死傷者数を見ると、建設業が最も多く、建設現場における熱中症リスク管理は特に重要な問題である[3]。

熱中症のリスク管理を目的に、1954年にアメリカでは「WBGT」という指標が考案された[4]。単位は気温と同じ摂氏度(°C)で示されるが、値は気温とは異なり、人体の熱収支に与える影響の大きい①気温②湿度③輻射や風速の3つを取り入れた指標である。

Table 1.1.1 WBGT 値と気温、相対湿度との関係[4]

		相対湿度(%)																
		20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
気温(°C)(乾球温度)	40	29	30	31	32	33	34	35	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44
	39	28	29	30	31	32	33	34	35	35	36	37	38	39	40	41	42	43
	38	28	28	29	30	31	32	33	34	35	35	36	37	38	39	40	41	42
	37	27	28	29	29	30	31	32	33	34	35	35	36	37	38	39	40	41
	36	26	27	28	29	29	30	31	32	33	34	34	35	36	37	38	39	39
	35	25	26	27	28	29	29	30	31	32	33	33	34	35	36	37	38	38
	34	25	25	26	27	28	29	29	30	31	32	33	33	34	35	36	37	37
	33	24	25	25	26	27	28	28	29	30	31	32	32	33	34	35	35	36
	32	23	24	25	25	26	27	28	28	29	30	31	31	32	33	34	34	35
	31	22	23	24	24	25	26	27	27	28	29	30	30	31	32	33	33	34
	30	21	22	23	24	24	25	26	27	27	28	29	29	30	31	32	32	33
	29	21	21	22	23	24	24	25	26	26	27	28	29	29	30	31	31	32
	28	20	21	21	22	23	23	24	25	25	26	27	28	28	29	30	30	31
	27	19	20	21	21	22	23	23	24	25	25	26	27	27	28	29	29	30
	26	18	19	20	20	21	22	22	23	24	24	25	26	26	27	28	28	29
	25	18	18	19	20	20	21	22	22	23	23	24	25	25	26	27	27	28
	24	17	18	18	19	19	20	21	21	22	22	23	24	24	25	26	26	27
23	16	17	17	18	19	19	20	20	21	22	22	23	23	24	25	25	26	
22	15	16	17	17	18	18	19	19	20	21	21	22	22	23	24	24	25	
21	15	15	16	16	17	17	18	19	19	20	20	21	21	22	23	23	24	

危険 31°C以上
嚴重警戒 28°C~31°C
警戒 25°C~28°C
注意 25°C未満

危険、嚴重注意等の分類は、日常生活上の基準であって、労働の場における熱中症予防の基準に当てはまらないことに注意が必要である。

しかし WBGT には「作業強度、服装、個人差」と言った実際にその人のその場における熱中症リスクまでは考慮されておらず万能な指標ではない。また熱中症は重症化すると危険なため、症状が軽い段階に予防を行うことが大切であり、厚労省は、作業開始前より 1.5%を超えて体重が減少した場合、すなわち発汗量が多かった場合、暑熱な作業を中止させ作業前の状態に戻るまで休憩を取らせる必要がある、と指導している[5]。

そもそも人間は、内臓の温度（核心温）をほぼ 37°C で一定に維持することによって、細胞を正常に機能させることができている。体温が上昇すると、細胞の活性が低下して内臓の機能も徐々に低下し、核心温が 42°C になると細胞内のたんぱく質が不可逆的に変形してしまい、細胞が死に、内臓の機能は重大な障害をきたし、生命を維持できなくなる。そこで人間は、体温上昇が始まると汗をかいて体表面に水分を広げて蒸発させ、蒸発熱を奪わせることで体熱をさらに放散させる。30°C 前後の体表面で、水分 1ml あたり 0.58kcal の蒸発熱を奪い、体熱の放散の 95% が汗の蒸発に依存するようになる。人間の身体の比熱は 0.83 程度なので、汗 100ml をすべて皮膚表面で蒸発させることができれば体重 70kg の人の体温は約 1.0°C 下げることができる。こうやって人間は、発汗により体温を調整し、熱中症になるのを防止する[6]。

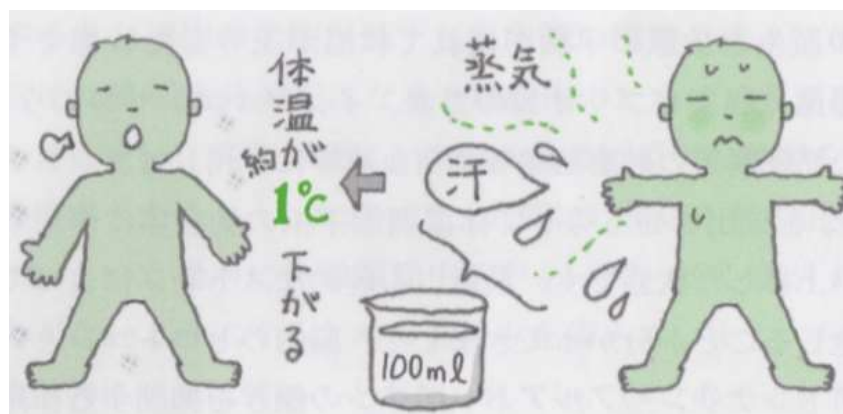


Fig.1.1.6 発汗と体温上昇[6]

現場の作業者は、水分補給に意識しながら、熱中症に気をつけ、真夏は厳しい現場で作業を継続しなければならない。そのためには発汗によって消失した水分を補充する必要があり、何時、どの程度摂取すればよいのか、定量的に把握できると安心して作業ができるものと考えられる。

## 1.2 研究目的

以上述べてきたように、近年熱中症予防は大きな社会問題となっており、特に建設業では大きな社会課題であり、その課題解決には強い社会的な要請がある。この問題を解決するためには、前述したように、熱中症に罹患する前の段階で、全身の発汗量をリアルタイムで把握し、水分補助を助言できるアドバイス等が出来れば、熱中症予防として有効であると考えられる。

このため本研究では、まず、そのようなデバイス（機器）を開発することを目的とし、建設現場で着用義務のあるヘルメットに着目し、ヘルメットで頭部発汗量を計測できる原理を考案し、それを具現化し、実際の作業現場で使用し、頭部発汗量が計測可能であることを検証する。

さらに計測した頭部発汗量から全身発汗量を推定し、熱中症罹患時に見られる深部体温の上昇と比較し、推定された全身発汗量が熱中症罹患早期推定指標にできないか、その適用可能性について考察を行う。そして頭部発汗量以外に、他のセンシング情報も付加することで、より良い熱中症予防システムが構築できないか考察を行い、産業分野における熱中症予防システムの応用提案はもちろん、学校スポーツにおける熱中症予防への応用についてまで考察を行い提案することを目的とする。

## 1.3 本論文の構成

本論文は全8章から構成され、各章の内容は以下の通りである。

第1章では、本研究の研究背景と研究目的について述べる。

第2章では、熱中症の機序と実情及び現在使われている熱中症予防システムの課題について述べる。

第3章では、現状課題を解決するヘルメット型発汗計測手法の原理と検証結果について述べる。

第4章では、安静時におけるヘルメット型発汗量計測デバイスの検証結果について述べ、

第5章では、行動時におけるヘルメット型発汗量計測デバイスの検証結果について述べる。

第6章では、開発したヘルメット型発汗量計測デバイスの課題対応と、より高精度な熱中症早期罹患指標に関する検討結果を述べ、そのうえで統合型ウェアラブル熱中症予防デバイスシステムの提案を行う。

第7章では、統合型ウェアラブル熱中症予防デバイスシステムの応用展開について論じ、

最後に第8章では、本論文の結論を述べる。

参考文献

- [1] Cristian Proistosescu, Peter J. Huybers, Science Advances, 05 July 2017: Vol3, No7, e1602821
- [2] 気象庁ホームページ, [https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/temp/an\\_jpn.html](https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/temp/an_jpn.html)  
(アクセス 2020年12月19日)
- [3] 厚生労働省, 職場における熱中症による死傷災害の発生状況 報道発表資料  
[https://www.mhlw.go.jp/stf/newpage\\_04759.html](https://www.mhlw.go.jp/stf/newpage_04759.html) (アクセス 2020年12月19日)
- [4] 日本生気象学会, 「日常生活における熱中症予防指針」 Ver.3, 2013年3月1日
- [5] 厚生労働省, 熱中症関係通達 職場における熱中症の予防について, 平成21年6月19日
- [6] 堀江正知, 熱中症を防ごう, 中央労働災害防止協会, 平成21年7月7日
- [7] 大塚製薬ホームページ, 熱中症になりやすい年齢  
<https://www.otsuka.co.jp/health-and-illness/heat-disorders/age/> (アクセス2020年12月19日)

## 第2章

### 熱中症と熱中症予防

#### デバイスシステム

## 2.1 はじめに

第1章で述べた研究目的に従って、第2章では、まず産業分野における熱中症の発生状況と、熱中症の機序と仕組みを把握したうえで、既存の熱中症予防システムと発汗量計測について調査し、課題を明らかにする。

## 2.2 熱中症の統計

一年間の中で、どの時期に熱中症災害死者数が多いかを調査した。Fig.2.2.1に示されるように熱中症による労働災害死亡者は、真夏の最も暑い時期である7,8月に圧倒的に多いことが明らかである[3]。

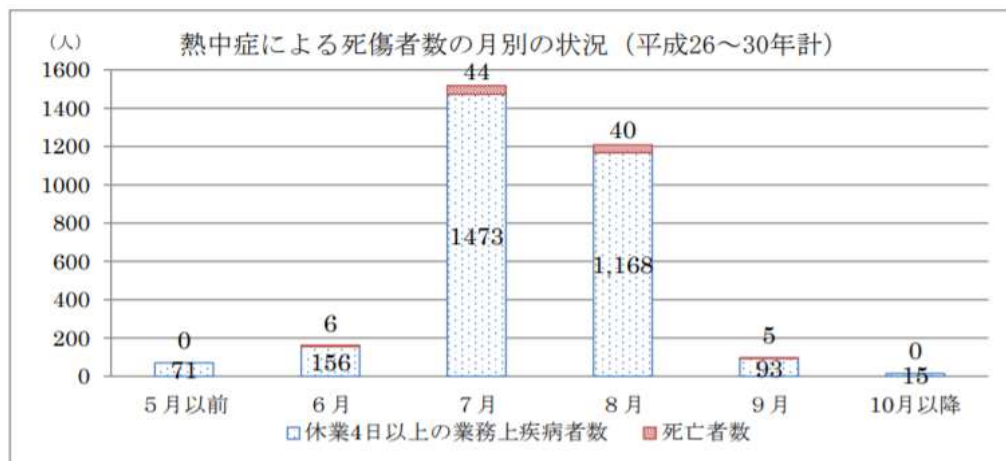


Fig.2.2.1 熱中症による死傷者数の月別状況 (平成26~30年計) [3]

また、Fig.2.2.2に示されるように熱中症による労働災害死亡者数の多い時間帯としては、日中の暑い時間帯である14時から16時が多く、次いで午前11時及び18時以降も多い傾向にある[3]。

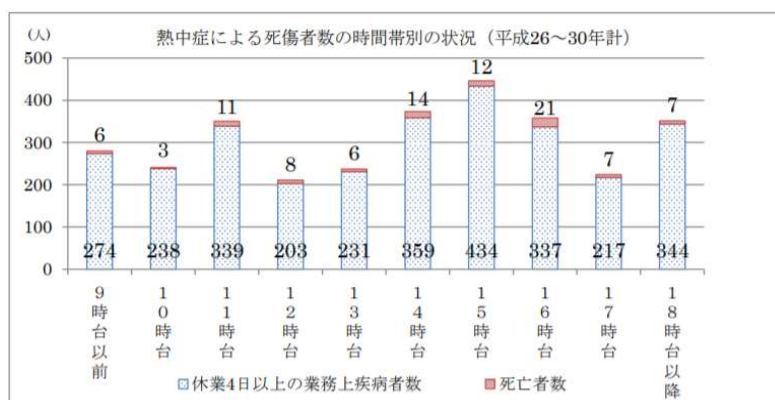


Fig.2.2.2 熱中症による死傷者数の時間帯別の状況 (平成26~30年計) [3]



以上のように、熱中症は1年の中で、最も暑い時期(7,8月)の最も暑い時間帯(14時～16時、11時)で多く発生する。この時間帯では、現場の作業者は当然汗をかきながら作業を行うことになるが、当然作業者は余計な物は身に付けたくはないと考えることが、容易に推察される。

次に、日本のどの地域で熱中症による救急搬送者が多いかを確認した。Fig.2.2.3示されるように、東京、大阪、愛知、埼玉、神奈川、兵庫、千葉、福岡など、人口が多く気温の高い地域に多いことがわかる[15]。

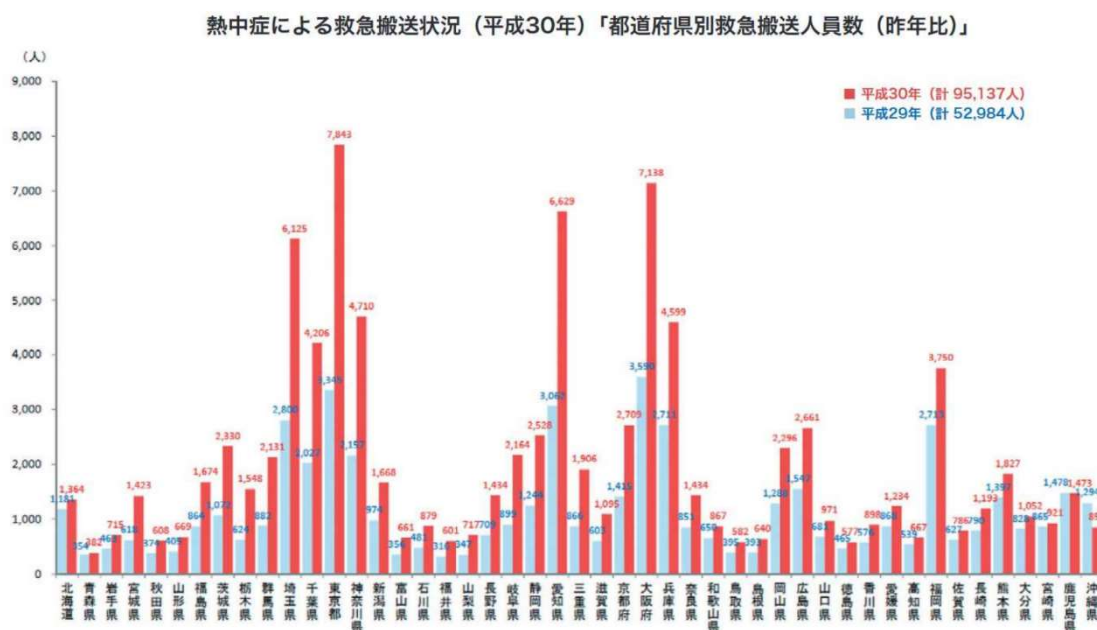


Fig.2.2.3 熱中症による救急搬送状況（平成30年）都道府県別[15]

さらに、熱中症による労働災害死亡者数を調査したが、Table 2.2.1に示すように、こちらは愛知県が最も多く、埼玉、静岡、東京、神奈川、福岡が年間で10名以上の方が熱中症で亡くなっているが、ほぼ全都道府県で、熱中症による死亡者が発生している[6]。 Fig.2.2.3及び Table 2.2.1より、熱中症は、人口が多く気温の高い地域はもちろんのこと、全国的な社会課題であることがわかる。

Table 2.2.1 熱中症による労働災害死亡者数、都道府県別 2003年~2014年[6]

熱中症による死亡者数	県
16人	愛知
15人	
14人	埼玉 静岡
13人	東京
12人	神奈川 福岡
11人	
10人	三重
9人	茨木 大阪
8人	千葉
7人	京都 兵庫 奈良 岡山 山口
6人	北海道 鹿児島
5人	滋賀 熊本 沖縄
4人	宮城 秋田 栃木 富山 福井 広島 長崎
3人	岩手 群馬 新潟 岐阜 島根 徳島 香川
2人	福島 石川 山梨 佐賀 宮崎
1人	山形 長野 和歌山 鳥取 愛知 高知 大分
0人	青森

次に、予防すべき熱中症の症状を把握するため、熱中症による災害死亡者の特徴を分析し、Fig.2.2.4に示した。

引用した研究[6]から、労働災害死亡者が意識を消失する前に自覚症状を訴えていたのは約1/3にとどまり、その症状も「具合が悪い」といった非特異的なものばかりであることがわかった。周囲で観察していても、多くの事例では、突然に、意識消失、ふらつき、けいれん、座り込み、転倒を生じている。このように熱中症は早期発見が難しいことから、気象条件（蒸し暑さ）、作業条件（身体活動、服装、作業時間帯）、個人の体調を考慮して、早い段階での予防を徹底することが重要であると考えられる。

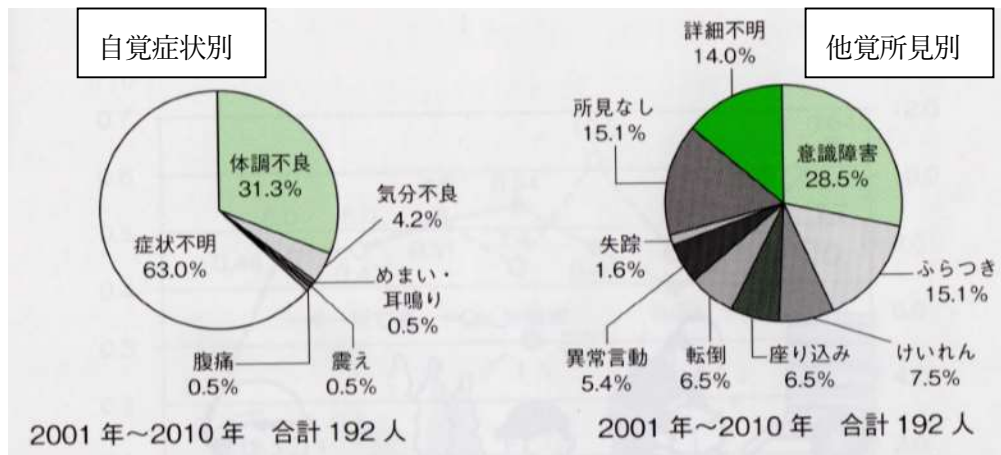


Fig.2.2.4 熱中症労働災害死亡者数[6]

## 2.3 熱中症の機序

### 2.3.1 人の体温調節[6],[9]

熱中症の機序は、人の体温調節制御とかなり関連が強いため、まず人の体温調節について述べる。環境温度が上昇すると体温が上昇し、第一章でも述べたように、体温は一定(37°C)に保とうと体温調節機能が働く。まず脳の視床下部に位置する視索前野が血液を皮膚血管に回し、血管拡張するよう指示を出す。そして同様に視索前野の指示で、交感神経が汗腺を刺激し発汗を促す。皮膚表面の発汗により、体表面に水分を蒸発させ、蒸発熱を奪わせることで体熱放散させ体温を低下させる、Fig.2.3.1に示されるようなメカニズムである[9]。

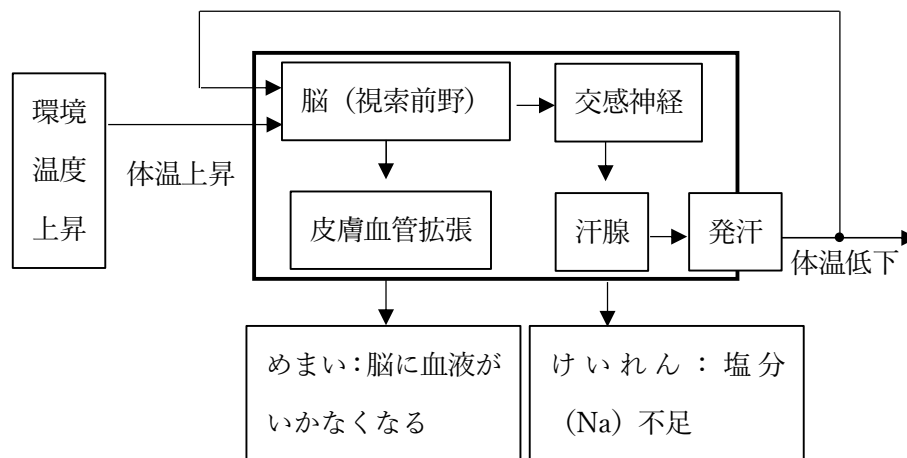


Fig.2.3.1 体温調節機能と熱中症の関係

環境温度が上昇するとこれを繰り返し、体温を一定に保持しようとするが、長時間続いた場合、血流を皮膚に長時間回すことにより脳への血液が不足し、めまいが生じたり、塩分不足によるけいれん、といった熱中症の症状が発生することとなる[6]。

この際、深部体温の上昇よりも発汗の発生の方が早く起こると言われている[54]。

以上のことから、熱中症の機序から考察すると、環境温度上昇に伴う体温上昇が引き金となり、体外への発汗の形で水分と塩分が排出されることで体温が調整されることがわかる。

以上が人の体温調節機能の概要と熱中症の機序との関係になるが、さらに熱中症の機序を俯瞰して考察する。

### 2.3.2熱中症の機序[6]

Fig.2.3.2に熱中症の機序を示す。熱中症は、高温多湿な環境下で、順化していない者が、急に、身体負荷の高い活動に従事することで発生する。透湿性及び通気性の悪い服装や保護具を身に着けて、休憩をあまり取らずに肉体労働に従事していると、体温が上昇し、皮膚血管の拡張や発汗による脱水とナトリウム濃度の異常から、内臓の循環障害や脳の温度上昇が生じて、骨格筋、消化管、肝臓、腎臓、脳などにその影響が現れて、多様な症状を呈す。症状には、筋肉のつり、めまい、頭痛などあるが、早期発見に有用な特徴的なものはない。仕事に没頭していると、いつの間にか体温が上昇して正常な判断ができなくなり、突然意識がなくなったり全身のけいれんを起こしたりする事例もある。

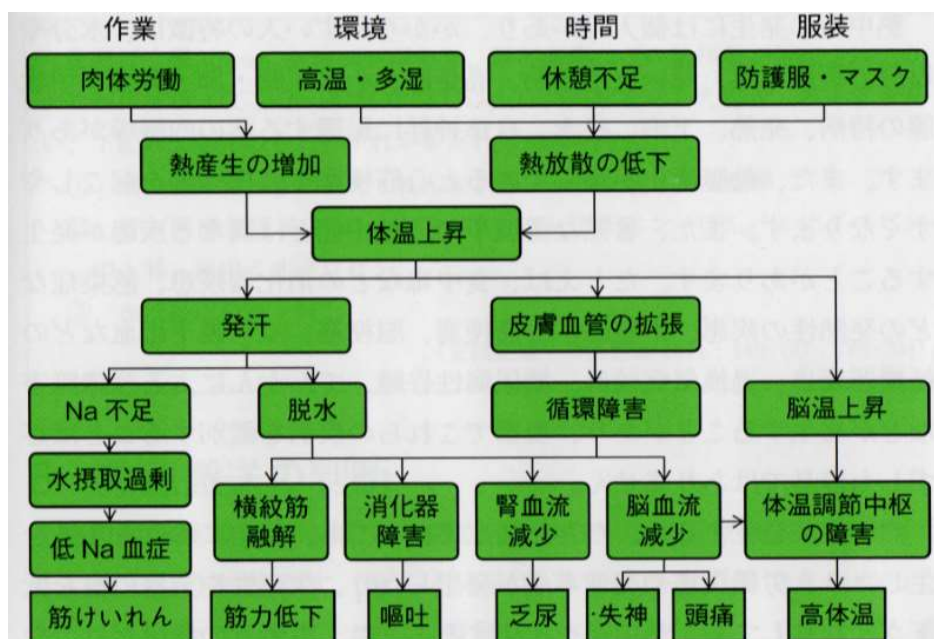


Fig.2.3.2 熱中症の機序[6]

## 2.4 熱中症の分類[5]

熱中症は、Table 2.4.1に示されるように、重症度により「I度」「II度」「III度」に分類され、意識がはっきりしていて、自力で水分や塩分を摂取出来て、軽快する傾向が見られるのであれば「I度」と考えられるが、そうでなければ医療機関に搬送する必要がある。

Table 2.4.1 熱中症の重症度[5]

熱中症の分類	症状	重症度
I度	めまい・立ちくらみ 筋肉痛・筋肉の硬直 大量の発汗	小
II度	頭痛・吐き気・嘔吐・虚脱感	↓
III度	意識障害・けいれん・手足の運動障害 高体温	大

このためI度の症状を早期に把握し、I度もしくはI度に至る前に水分や塩分を補給することで、重症化を防止することができると考えられる。そしてI度の症状の中で「めまい・立ち眩み、筋肉痛、筋肉の硬直」を定量的に把握するが難しいのに対し、「発汗」は個人的、定量的に把握が可能であると考えられる。熱中症の機序から考察しても、被験者個々に装着したデバイスで比較的容易に体外から連続的に計測できそうな熱中症罹患に関する生体反応量は、「発汗量」であると考えられる。

## 2.5 熱中症予防システム

### 2.5.1 従来の熱中症予防アラート研究

古くから様々な熱中症対策が研究[18]されており、高温下での労働において労働の許容度のアラートを発出することに関する研究もなされている。Table 2.5.1に、それらの研究まとめた。

Table 2.5.1 従来の熱中症予防アラート研究例[18]

研究内容	パラメータ	研究者
脈拍数125以上を急性熱中症発現の限界とする	脈拍数	大和田[10]
脈拍数150以上を急性熱中症発現の限界とする	脈拍数	三浦,鈴木[11]
発汗量が4l以上を急性熱中症発現の限界とする	発汗量	斉藤[10]
W.B. 31.1°C以上を急性熱中症発現の限界とする	温度	Haldane[18]
W.B. 33.0°C以上（中程度作業）を急性熱中症発現の限界とする	温度	庄司,相沢[12]
脈拍数125,直腸温38.3°C、夏季軽作業で29.4°C、中程度作業で26.7°Cを許容度の目安とする	脈拍、深部体温、温度	Yaglouら[13]
4時間に4.5lの発汗量を持って限界とする、予想される4時間の発汗量の図表を作成しそれによって決める	発汗量	McArdleら[14]
脈拍数が70~80→125また直腸温が36.7~37.2°C→38.3°Cになる時間を安全限界とし高温環境の安全曝露時間を決める	脈拍数 深部体温	Amerら[18]

ほとんどの研究例は急性熱中症を予防するため「温度、労働強度、曝露時間」をインデックスにして労働の許容範囲を経験や実験において決めている例が多い。発汗量や温度・深部体温のように熱中症に直接影響するパラメータを指標にしている例も多く、また脈拍数も体調不良や労働負荷で上昇することから、影響を測る手段として、手軽に計測できるため使用されているものと考えられる。

## 2.5.2 ウェアラブルな熱中症予防システム

特に本研究が目指しているウェアラブルな熱中症予防システムについて富士キメラ総研の資料[19]と販売会社へのヒアリングを基に、Table 2.5.2にまとめた。市販されているシステムは暑熱環境下での作業を課題としてとらえ、現在はそれを予防するサービス市場が立ち上がりつつある状況である。市場は2016年に実証実験が行われ、2017年に初のサービスが開始され、2018年に徐々にサービスが広がり、2019年も拡大傾向にある。国も従業員の健康への投資促進にインセンティブを検討する方針で、中期的に市場拡大が見込め、2020年の市場規模予測は4.5億円程度で年成長率は20%程度と予測されている[19]。

Table 2.5.2 熱中症予防システムの現状

テーマ/メーカー	概要	センサ	無線	初期費用	価格
みまもりがじゅ丸 NTPPCコミュニケーションズ [24] 	心拍を分析し個人差を踏まえた体調変化や疲労を推定、危険や異常を警告。 NETISに認定され実績拡大中	心拍 加速度 位置 (スマートフォン)	BT	不明	2000円/月 10人
Envital [25] 大林組・NTTcom 	作業員の心拍数と作業現場の環境データから、身体への負荷を判定しアラートを発生。積極的に外販も展開	心拍 加速度 WBGT	ビーコン	10万円 50人	5000円/月
Smart fit for work クラボウ,信州大学 KDDI等[20] 	作業員の心拍と現場の気象情報を解析し作業員の「リスク」や「体調変化」を通知する	心拍 加速度	BT	不明  機器3万円 3年	6000円/月 100人迄
SafeNAVI [26] 安全支援 ソリューション HOYA 	各種タイプの機器から「転倒・位置・熱中症リスク」を分析しアラートを管理者に知らせる	心拍 加速度 皮膚温 GPS 活動量 (スマートフォン)	BT LoRa WAN	10万円 500人  機器3万円	2000円/月
ユビキタスウェア 富士通[27] 	脈拍と温湿度から「熱ストレスレベル」を推定し、アラートを通知する	脈拍 温湿度	BT	不明	個別見積り



ここでは、調査したシステムの中で、最も熱中症予防システムとして完成度が高いと思われるSmart fit for work (クラボウ社) [20]を取り上げ、詳しく述べる。当該システムでは、作業者は、シャツタイプのウェアラブル機器を身に着け、専用のスマートフォンを携帯する。シャツで心拍と加速度が自動計測され、加速度データから作業強度を、心拍と気象情報(温度など)から熱ストレスを求め、その両方の情報の強さから暑熱作業リスクを3段階(ほぼ安定、注意、危険)で求め、リスク度合いをスマートフォン経由で管理者に自動的に伝送し、別の場所で作業現場のリスク管理を行うシステムとなっている。

産学共同(大阪大学(医学データ解析)、信州大学(シャツ)、ユニオンツール(心拍計)、KDDI(クラウド通信)、日本気象協会(気象データ)、株式会社セック(システム構築)で知見を結集し、数年間力活動を行っているが、実際に販売員にヒアリングを行ったところ、まだテスト段階に近い、とか「シャツがきつくてイヤ」と言う声が多く聞かれ、採用実績はそれほど多くないと推測できた。

一般的に普及していて、使用できそうな心拍・加速度センサを活用し、作業者の活動状況を大まかに観察していると考えられるが、作業者は窮屈なシャツを着なければならず、月一人あたり6000円/円払う(イニシャル別)価値があるかどうかは、活用現場もしくは導入企業が個々に、費用対効果を勘案し判断することであるが、疑問が残る。



Fig.2.5.1\_1 Smart fit for work パンフレットからの抜粋内容[20]

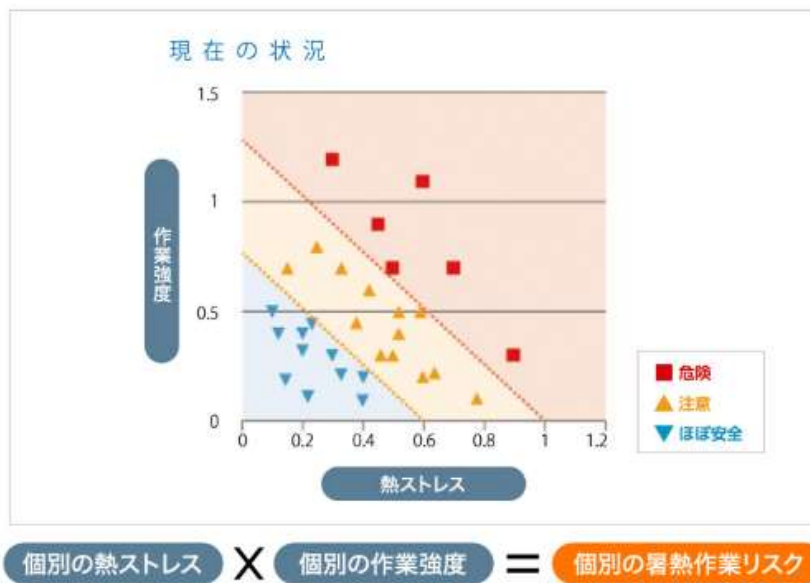


Fig.2.5.1\_2 Smart fit for work パンフレットからの抜粋内容[20]

調査の結果、現状のウェアラブルな熱中症予防システムの熱中症罹患のリスクの判定は、市販のウェアラブル機器等で計測できる心拍（脈拍）と加速度に、温度情報も参照し、各社が経験則的に閾値を定め、熱中症のリスク判定を行っているのが実情であり、熱中症予防の詳細なロジックは不明である。

## 2.6 現状の熱中症予防システムの課題

以上述べてきたように、本来、理想的な熱中症予防システムは、熱中症発生の機序から考えると、全身発汗量を用い、アラートを発生させるのが望ましいと考えられるが、現在実用化されている熱中症予防システムでは、発汗情報を用いているシステムは存在せず、心拍と加速度及び温度による経験則的な判断によって、アラート発生させているものがほとんどである。

このため、本研究では、熱中症の機序によって発生する、発汗に着目した熱中症予防システムを検討し提案を行うこととした。Table 2.6.1に、熱中症の症状と熱中症予防アラートに用いる情報について整理した。

Table 2.6.1 熱中症の症状と熱中症予防アラート発生に用いる情報

熱中症の症状	医師の診断方法	熱中症予防アラート発生に用いる情報	
		他社	本研究
大量の発汗	問診 直接観察	心拍（脈拍） 加速度 温度	発汗量
めまい、立ち眩み 頭痛、嘔吐 意識障害、けいれん			
深部体温の上昇			

## 2.7 発汗量計測方法

次に、既存の発汗量計測手法にはどのような方式が存在するか、調査してTable 2.7.1\_1とTable 2.7.1\_2にまとめた。様々な発汗量計測手法が提案されてはいるものの、現時点では本研究が目的とするような、個人の全身発汗量を定量的かつ経時的に計測できる方式は存在しなかった。

Table 2.7.1\_1 発汗量計測方法の分類[17]


方式	計測方法	長所	短所	使用分野
体重計測法 Fig.2.7.1 Table 2.7.2	測定前と、運動等の活動後の、体重差を持って発汗量を測定する方法	体重計で計測が可能、総発汗量がわかる（定量的）	体重計が必要で、ウェアラブルな形態では実現不可能  継続的な発汗状況は分からない	温熱性発汗の研究など
換気カプセル法 [28] Fig.2.7.2 Table 2.7.3	換気されているカプセルを被験者へ装着することで局所的に発汗を測定できる	カプセルを取り付けるだけなので計測は簡単、局所的ではあるが継続的な発汗の状況や発汗量がわかる	局所での発汗計測のため全身の総発汗量は分からない	各分野での研究
ミノール法	ヨード、ヒマシ油、無水アルコールの混合液を全身に塗布し、乾燥後デンプンをむらなく吹き付ける。汗をかくと発汗部は紫色に変色するので発汗出現部位がわかる。継続的な発汗状況を写真等で記録する	全身の発汗出現部位がわかる。自律神経のどの神経節の異常なのか、ある程度推測ができる（定性的）  [消費科学解説記事掲載論文 2009. 2 坂口氏 ]	総発汗量はわからない。全身に検査液を塗るため被験者への負担が大きい	自律神経分野の研究・検査

Table 2.7.1\_2 発汗量計測方法の分類[17]

方式	計測方法	長所	短所	使用分野
光コヒーレンス ストモグラフィ (OCT)	近赤外線の光で断層画像を作り、皮膚下の汗腺の状況を測定する	皮膚表面には出てこない汗の状況も把握可能 1つの汗腺の観測が可能	機材が高価。局所的なので総発汗量は分からない	皮膚科学分野、生理学分野での研究
皮膚電気活動 (EDA)	精神性の発汗出現前に起こる皮膚での電気的な変化を捉える方法。 精神性の発汗部位(手掌・足底)に電極を取付け、汗腺の活動によって誘導される電気変化を捉える	電極を装着するだけで計測可能。機材が比較的安価  (株) クア外社製	皮膚の電気的な変化のため厳密には発汗現象ではない。定性的な変化のため正確な発汗量は分からない	人間工学・心理学分野の研究
吸着材を用いた電気容量計測法 [22]	電極に接続された吸着材の汗の量を電気容量の変化としてとらえ計測する方式	ウェアラブル形態での発汗計測手法提案  ライフケア技研 (株)	計測値から全身発汗量の推定が困難、一時的な発汗が残留し経時的な計測に悪影響を与える可能性がある	熱中症予兆チェッカーなど

従来からの発汗量計測手法として良く知られている手法は、体重減少量を全身発汗量とみなして計測する方法[8] (Fig.2.7.1, Table 2.7.2) や、局所的な部位の発汗量測定手法[28](Fig.2.7.2, Table 2.7.3)が代表的なものである。

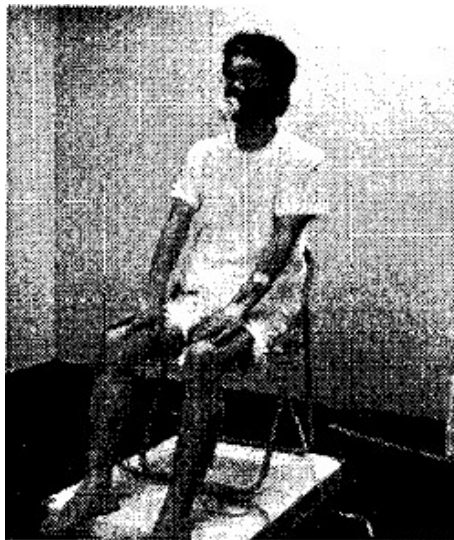


Fig.2.7.1体重減少量による発汗量測定方法[8]

Table 2.7.2 体重減少量による発汗量測定方法の温熱生理量測定環境 [8]

測定項目	使用機器	測定間隔	
環境	温度	T型熱電対データロガー	1分
	湿度	アスマン通風乾湿計	1分
	気流	微風速計	1分
生理量	代謝量	呼吸代謝測定装置	1分
	深部温	赤外線式耳用体温計	5分
	皮膚音	T型熱電対データロガー	1分
	発汗量	精密秤量計	1分



Fig.2.7.2 局所的な部位の発汗量測定器[28]

Table 2.7.3 (株) スキノス社製 SMN-1000[28]

会社	株式会社スキノス
品名	SMN-1000
方式	換気カプセル型差分方式
空気流量	流量補償方式 300ml ~ 1,000ml
最小表示	0.01mg/min
最大表示	4.09mg/min
推奨環境条件	温度 23.5°C、湿度 60%RH
電源	DC6V2Aアダプタ、単三乾電池

以下に、局所発汗量計測手法として用いられてきた、換気カプセル法について、本研究原理の参考としたので詳しく説明する。提案されている各種の発汗量計測手法のうち、換気カプセル法は局所発汗量を正確に計測でき、ウェアラブル計測にも適用[28]できるものである。Fig.2.7.3に換気カプセルの簡単な構成を記載するが、カプセル③と湿度センサ②④、キャリアガス換気装置（窒素ポンベ、ポンプ等）①で構成される。

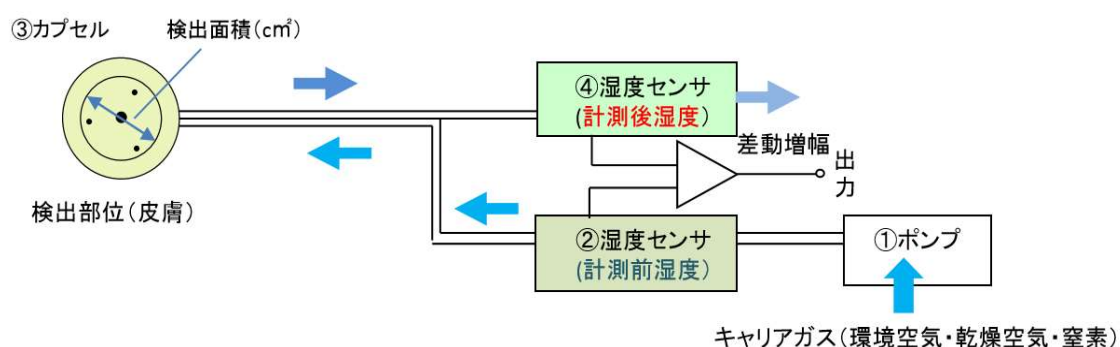


Fig.2.7.3 換気カプセル法原理図 [17]

換気カプセル法は汗をキャリアガスによって蒸発させて湿度センサで計測するシステムで、キャリアガスは窒素ガス(湿度0%)や試験環境の空気を使用する。キャリアガスは①ポンプから1個目の②湿度センサを通り、そこで現在の湿度を電気信号に変換し、計測前湿度が計測される。②のセンサを通ったキャリアガスは③カプセルに到達し、水分がある場合、キャリアガスによって蒸発が起こる。キャリアガスはそのまま④湿度センサに送られ、湿度を電気信号に変換され、計測後湿度が計測される。カプセルを通ったキャリアガスはカプセル内に水分(汗)があった場合、④のセンサでは②のセンサに比べ差が出ており、その差をカプセル内で出現した水分(汗)の量と判断する。換気カプセル法が考案された当初は窒素ポンベ(湿度0%)を使用した機器であったが、が最近は消耗品のコストやシステムの手軽さ等で環境空気が使えるタイプがほとんどである。Fig.2.7.4とFig.2.7.5にその製品の事例を示す。





Fig.2.7.4 発汗計(本体) [17]



Fig.2.7.5 発汗計(カプセル部) [17]

換気カプセル法は1960～70年代には考案され、制作・使用されてきた測定法で、最大の利点は発汗の継時的な現象を捉えることができることである。従来の発汗測定では総発汗量は計測できたが、その過程は計測できず、その継時的な変化を捉えることができるようにしたのが換気カプセル法である。ただし、Fig.2.7.5で良く表されているように、局所での発汗計測手法であり、全身の総発汗量を計測することはできない。

換気カプセル法は、改善提案が報告されている。先行研究[23]ではより小型でウェアラブルな発汗計を目指し小型化にするため、測定部面積の最小化 ( $0.3\text{cm}^2$ ) とそれによる低流量化で小型化の実現を行っているが、センシング箇所が局所化し全身発汗量へ面積換算する際の差異が大きくなると考えられる。またセンシング箇所は極小化できているが、電源供給とポンプ制御は外部PCで行われており、システムまで含めてウェアラブルな計測機器の形態とすることは実現できていない。

## 2.8 まとめ

本章では、既存の熱中症予防システムと発汗量計測の既存研究に関して調査した内容をまとめ、その課題を明らかにした。

まず、熱中症の機序を整理した。

次に、現状の熱中症予防システムを調査し、その課題を明らかにした。従来の熱中症予防アラートは、心拍数（脈拍数）と加速度及び温度によるものが多く、市販されているウェアラブルな熱中症予防デバイスシステムも、加速度に応じた脈拍数と温度でリスク判定しているものがほとんどであり、熱中症の機序に沿った判定器機は存在しないことがわかった。

熱中症の機序から考察すると連続的に計測出来そうな生体反応量は「発汗量」であると考えられるが、行動下における個人の全身発汗量を正確に、定量的かつ経時的に計測できる方式は存在しないことがわかった。

既存研究調査全体から、世の中には存在しない、熱中症の機序に沿ってより確実に熱中症罹患を予測できるシステムに価値がありそうなことがわかった。

参考文献

- [8] 沢崎他, 屋外暑熱環境の温熱評価手法に関する研究, 生産研究 58 巻 3 号(2006), P323-327
- [9] 近藤他, 体温II (体温調節システムとその適応), 2010年11月25日 有限会社 ナップ
- [10] 渡辺, 暑熱環境と労働負担, 労働衛生工学特集号, Vol.28 No.6 1989, P413-422
- [11] 三浦他, 日本の高温労働, 労働科学研究所, 1963, p154-172
- [12] 庄司他, 高温労働の労働衛生生物学的研究, 医学と生物学, 13(1), 1948, p17-19
- [13] Yaglou, C.P. and Minard, D. (1957): Control of Heat Casualties at Military Training Centers, American Medical Association Archives of Industrial Health, Vol. 16: 302-316.
- [14] McArdle, M.D., Katch, F.I., and Katch, V.L. (1981): Exercise Physiology Energy, Nutrition, and Human Performance. Lea & Febiger, Philadelphia, 350.
- [15] 総務省消防庁リンク集, 消防の動き 2018年11月号, P5~P8  
[https://www.fdma.go.jp/publication/ugoki/items/3011\\_05.pdf](https://www.fdma.go.jp/publication/ugoki/items/3011_05.pdf) (アクセス2020年12月19日)
- [16] 環境省熱中症予防情報サイト 熱中症環境保健マニュアル2018 (アクセス2020年12月19日)  
[https://www.wbgt.env.go.jp/pdf/manual/heatillness\\_manual\\_2-1\\_2-2.pdf](https://www.wbgt.env.go.jp/pdf/manual/heatillness_manual_2-1_2-2.pdf)
- [17] スキノステクニクス株式会社, はじめての発汗測定 (アクセス 2020年12月19日)  
<https://ase-skiken.co.jp/wp-content/uploads/2020/01/ver1.00.pdf>
- [18] 堀内一弥, 熱帯医学会報, 1966年7巻1号
- [19] 富士キメラ総研, ウエアラブル/ヘルスケアビジネス総調査 2020
- [20] クラボウホームページ, Smartfit for work, <https://www.smartfit.jp/>  
(アクセス 2020年12月19日)
- [21] 岡他, 日本火災学会論文集, 心拍変動の周波数解析に基づく消防隊員の疲労状態推定手法に関する基礎研究, 65巻(2015)2号
- [22] ライフケア技研株式会社他, 「発汗計を搭載した世界初ウェアラブル型熱中症予兆チェッカーの開発」, 戦略的基盤技術高度化支援事業研究成果報告書, 平成30年3月
- [23] 鶴岡他, 生体医工学, 小型発汗計の開発とストレス負荷及び温熱負荷時の発汗計測, 54(5):207-217, 2016
- [24] NTTPC みまもりがじゅ丸 (アクセス 2020年12月20日)

<https://www.nttpc.co.jp/service/gajumaru/>

[25]大林組 Envital (アクセス 2020年 12月 20日)

[https://www.obayashi.co.jp/solution\\_technology/detail/tech073.html](https://www.obayashi.co.jp/solution_technology/detail/tech073.html)

[26]HOYA safeNAVI 安全見守りシステム (アクセス 2020年 12月 20日)

<https://www.hoyads.com/solution/iot>

[27]富士通 ユビキタスウェア (アクセス 2021年 1月 3日)

<https://www.fujitsu.com/jp/solutions/innovative/iot/uware/about/>

[28]坂口他, 換気カプセル方式による発汗・蒸散計の開発,信学技報 106(253),(2006.9.25), p65-

68

## 第 3 章

# ヘルメット型発汗量計測手法 の確立

### 3.1 はじめに

本研究では、第二章で述べた、既存研究による課題を解決するために、熱中症発生の機序から考えて、最も重要な情報と考えられ、かつ、比較的容易に体外から連続的に計測できるうち、発汗量を計測するデバイスシステムを考案し、さらに社会的要請が強く、熱中症が特に深刻な問題となっている建設現場等に向けて、作業者に常時着用義務のあるヘルメットに着目し、行動下発汗量計測機能を有するヘルメット型発汗量計測デバイスで発汗量を計測し、熱中症を予防できる可能性のあるシステムの提案を行うこととした。

本論文では、これらの内容に関して論述していくが、本章では、まず、ヘルメットで頭部の発汗量を計測できるシステムの開発について述べる。

### 3.2 ヘルメット型発汗計測方法の原理

局所発汗を計測する換気カプセル法[6]を改良し、より広い頭部全体を対象に計測を行う手法を考案した。まずTetensの式[35]より、ある温度 $t$  (°C) における飽和水蒸気圧 $e$  (hPa) を式(1)で近似する。

$$e_{1,2}(hPa) = 6.11 \times 10^{\left(\frac{7.5t_{1,2}}{(t_{1,2}+237.3)}\right)} \quad (1)$$

次にその時の相対湿度 RH(%)から式(2)で、単位体積当たりの空気中の水分量  $X$  (g/ m<sup>3</sup>) を求める。

$$X_{1,2}(g/m^3) = \frac{217 * e_{1,2}}{273.15 + t_{1,2}} \times \frac{RH_{1,2}}{100} \quad (2)$$

ここで、風量  $F$  (m<sup>3</sup>/sec) で空気の流入、流出を伴う空間系を考え、 $X_1$  を系に流入する水分量、 $X_2$  を系から流出する水分量とすると、系内で発生する単位時間当たりの水分量  $Y$  (g/sec) は、それらの物質収支から、(3)式で表される。

$$Y(g/sec) = F \times (X_2 - X_1) \quad (3)$$

したがって、風量が既知である場合、系に流入および流出する空気の温度及び相対湿度を温湿度センサで計測することで、単位体積当たりの空気中の水分量  $X_1, X_2$  を求め(3)式に代入すれば、この空間系内で発生する単位時間当たりの蒸発水分量である発汗相当量  $Y$  を計算で求めることができる(Fig.3.2.1)。

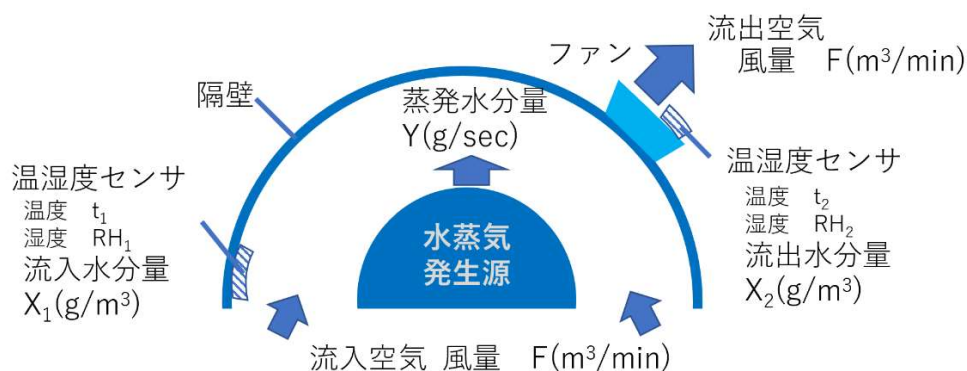


Fig.3.2.1 発汗量計測の原理図

Table 3.2.1に、第2章で説明した換気カプセル法[17]と、本研究方式[36]との蒸発水分量(発汗量)計測方式の違いを示す。換気カプセル法も本研究方式も、計測対象に対して、一定の流入空気での換気をし、その対象の水分量差による物質収支から、蒸発水分量を求めるという考え方は同じである。従来の換気カプセル法では、約314mm<sup>2</sup>という局所の発汗量しか計測できないのに対して、本研究では、体表面全体からの発汗量をなるべく正確に求めるために、サンプリング面積を大きく取り、頭部全体という体表面積の約1/14(約1,200cm<sup>2</sup>)を占める面積の蒸発水分量(発汗量)を一度に計測できるようにした。このため2つの湿度センサから蒸発水分量を算出するのは同様なものの、換気カプセル法は2つの湿度センサ間距離が近いので、温度一定として扱うのに対し、本研究では空気の入口と出口の両端2か所で温度を計測するシステムとした。すなわち、空気の入口と出口に、湿度センサの他に温度センサも湿度センサもペアで配置し、2か所の温湿度からそれぞれの絶対湿度(単位体積当たりの空気中に含まれる水分量)を計測・換算し、その差から頭部全体からの蒸発水分量(発汗量)を算出する点に違いがある。この方式により、局所箇所の発汗量ではなく、頭部全体からの発汗量が計測可能となる。

Table 3.2.1 換気カプセル法と本研究方式による水分蒸発量計測方式の違い

方式	換気カプセル法	本研究方式
模式図		
検出部位	皮膚表面の局所箇所	頭部全体
構造	換気カプセル	ファン付きヘルメット (閉空間)
センサ	湿度センサ 2 (RH <sub>1</sub> ,RH <sub>2</sub> )	湿度センサ 2 (RH <sub>1</sub> ,RH <sub>2</sub> ) 温度センサ 2 (t <sub>1</sub> ,t <sub>2</sub> )
流入空気 (風量)	一定 : F(m <sup>3</sup> /min) ポンプで一定供給 (換気)	一定 : F(m <sup>3</sup> /min) ファンで一定供給
発汗量 (蒸発水分量)	$Y = F \times (RH_2 - RH_1)$	$Y = F \times (X_2 - X_1)$ $X_{1,2}(g/m^3) = \frac{217 \cdot e_{1,2}}{273.15 + t_{1,2}} \times \frac{RH_{1,2}}{100}$ $e_{1,2}(hPa) = 6.11 \times 10^{\left(\frac{7.5t_{1,2}}{t_{1,2} + 237.3}\right)}$

### 3.3 原理検証実験

市販のファン付きヘルメットの空気流入部と流出部に温湿度センサを取り付けたウェアラブルなヘルメット型発汗量計測デバイスを作成し、このデバイスで(3)の原理式が成り立つかを検証するため、発泡スチロール製のマネキンヘッドにこのデバイスを取り付けて実験を行った(Fig.3.3.1)。具体的にはヒトの頭部発汗を模擬するために、水蒸気発生源としてマネキンヘッドの頭部に布を張り付け、なるべく露出する表面積が一定となり水分変動が一定となるよう、その布に一定量 (10g) の水を含ませ、電子秤 (エー・アンド・デイ社製, HT-200, 最小表示 0.01g) でマネキンヘッド全体の重量減少量の経時変化を 15 分間にわたり毎分計測した。

ファン付きヘルメット型発汗量計測デバイスの風量を正確にコントロールする為、JIS B3880、JIS A1431 に準拠した風量計測方法(Fig.3.3.3)で風量を計測し、さらに計測の最初と最後に電源電圧を測定し、測定中の風量変化を補正した。また流入・流出側の温湿度センサともセンサ出力の揃ったセンサをペアで使用したうえで、系内の温度が最も良く再現取れる場所にセンサを配置した(Fig.3.3.2)

流入及び流出側の温湿度センサデータは小型の PC である Raspberry Pi3 に接続されており、データは蓄積され、ヘルメット型発汗量計測デバイスの水分減少量は、電子秤の値を毎



分記録した。その時の計測フローを Fig.3.3.4 に示す。

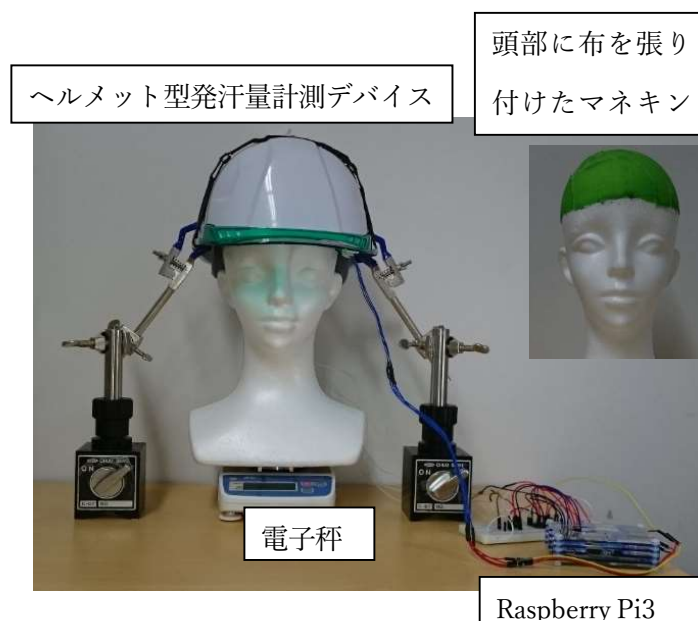


Fig.3.3.1 ヘルメット型発汗量計測デバイスによる計測原理検証実験装置

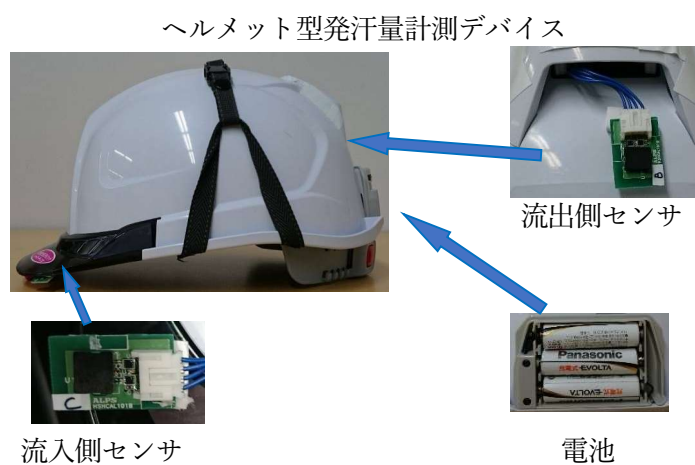


Fig.3.3.2 ヘルメット型発汗量計測デバイスの詳細

Table 3.3.2 デバイス使用器具及び部品

使用器具及び部品	型番	会社名
ファン付きヘルメット (Windy helmet)	No.394F	株式会社トーヨーセフティー
温湿度センサ	HSHCAL101B	アルプスカンパニー
プロセッサ	Raspberry Pi3	ラズベリーパイ財団
電子秤 (最小表示 0.01g)	HT-200	エー・アンド・デイ社
電源	単三電池 3本	Panasonic

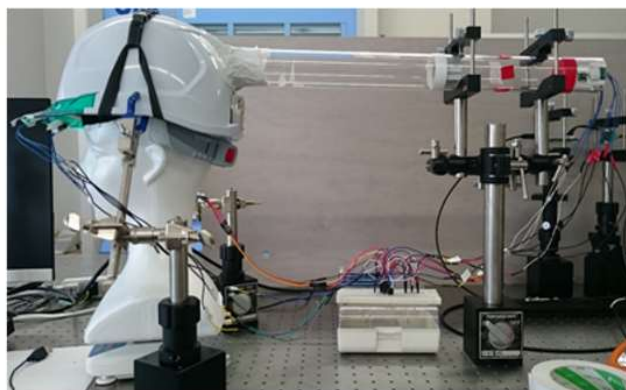
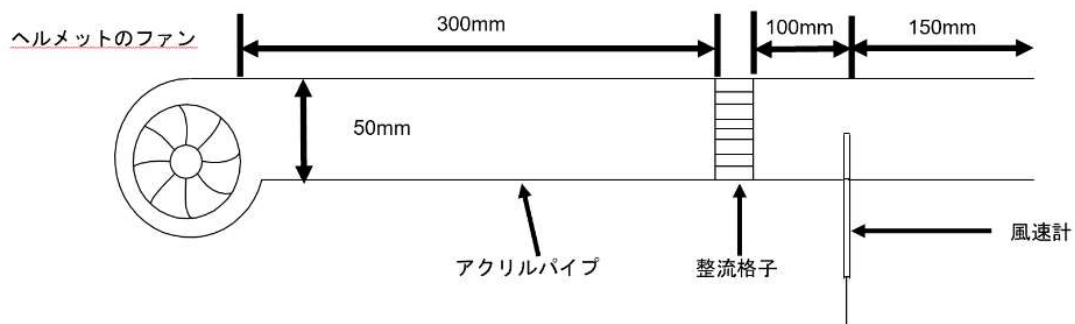


Fig.3.3.3 JIS (B3880,A1431) に準拠した風量計測方法とそれに基づいた本研究の風量測定の様子

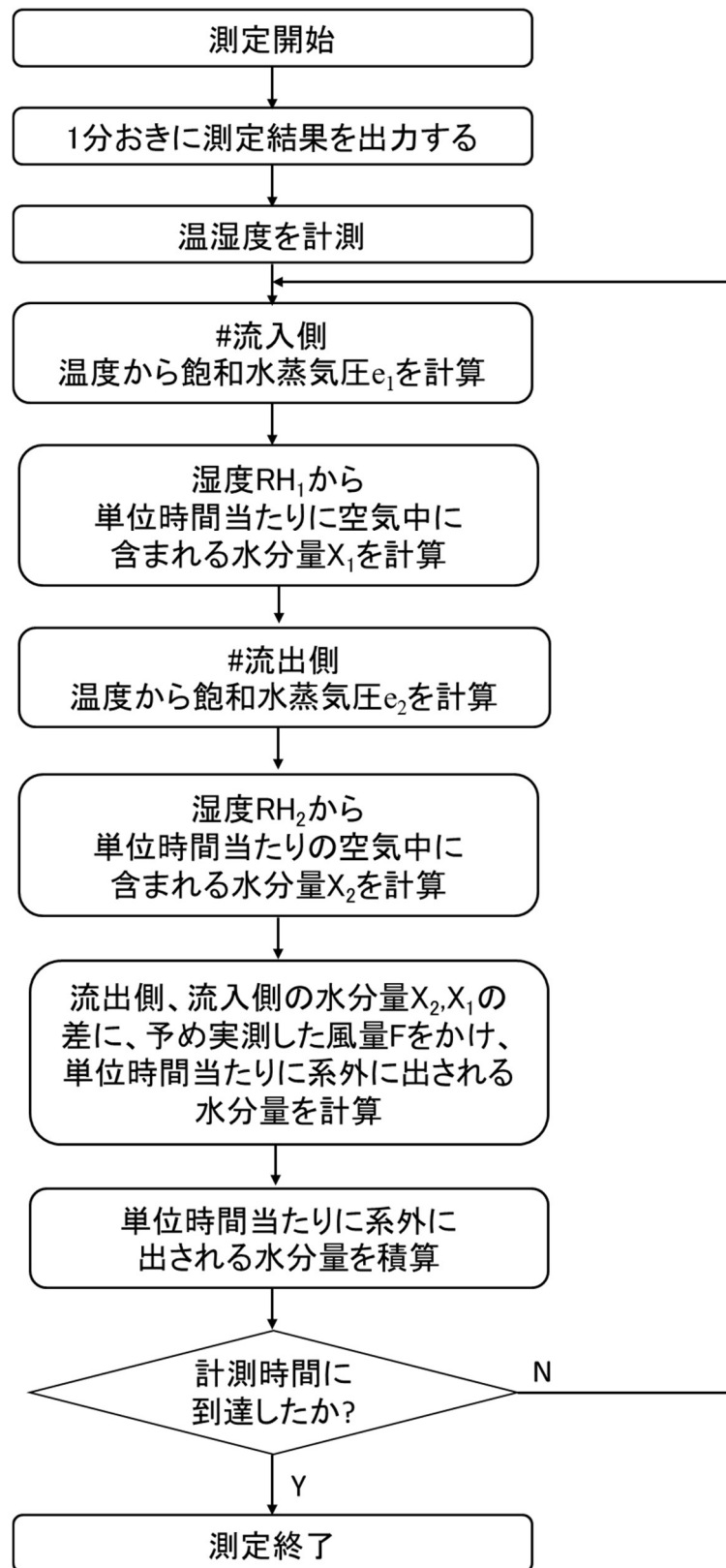


Fig.3.3.4 計測フロー

### 3.4 実験結果と考察

実験中に、当初の温湿度センサの配置位置だと、外部環境からの風の影響を直接受けてしまい、風があった時に異常な計測結果が出る状況が発生することがあった。このままでは、実際の測定環境でも悪影響があることが懸念された。そこで、温湿度センサ位置をヘルメットの内側に配置することで、外部からの風量影響が防げるのではないかと考え、Fig.3.4.1のように、流入・流出側ともセンサ位置を外部から風の当たらないヘルメットの内側に配置することとした。

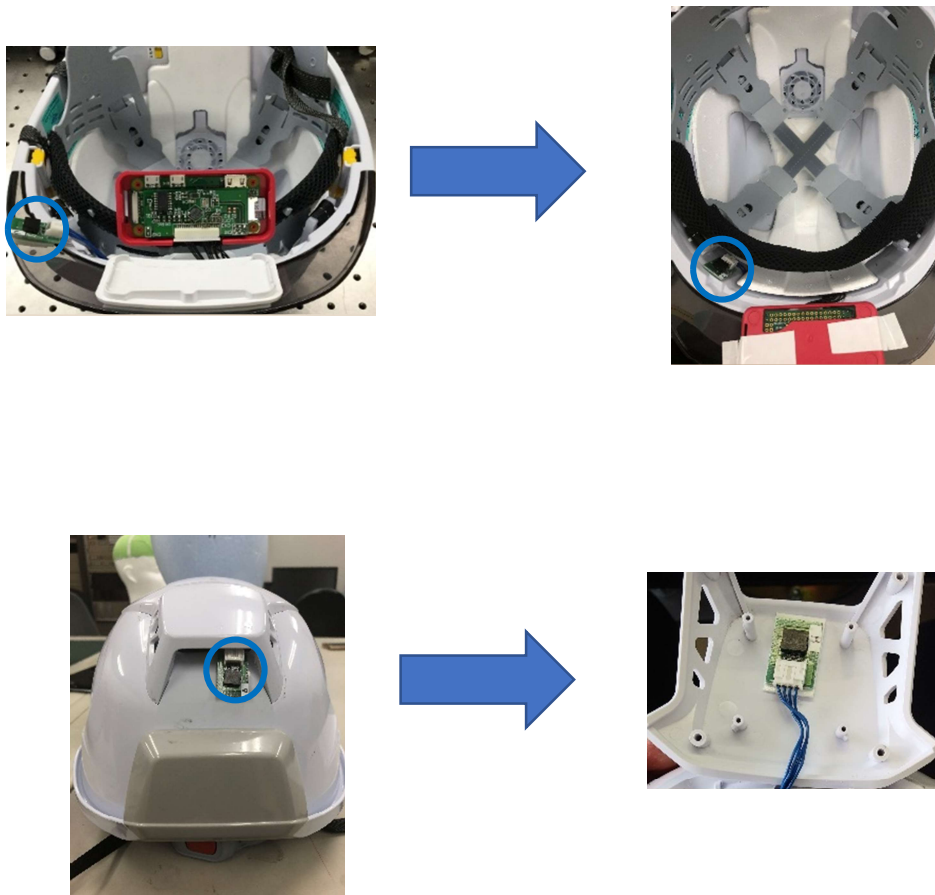


Fig.3.4.1 センサ位置の変更

外部からの風を受けにくい位置にセンサ位置を変更後、冷房下でマネキンを用いた原理確認実験を行ったが、秤積算水分量に対し、15分間の計測で54%あった誤差が4%に改善され、問題のないリニアリティーが確認できた (Fig.3.4.3)。

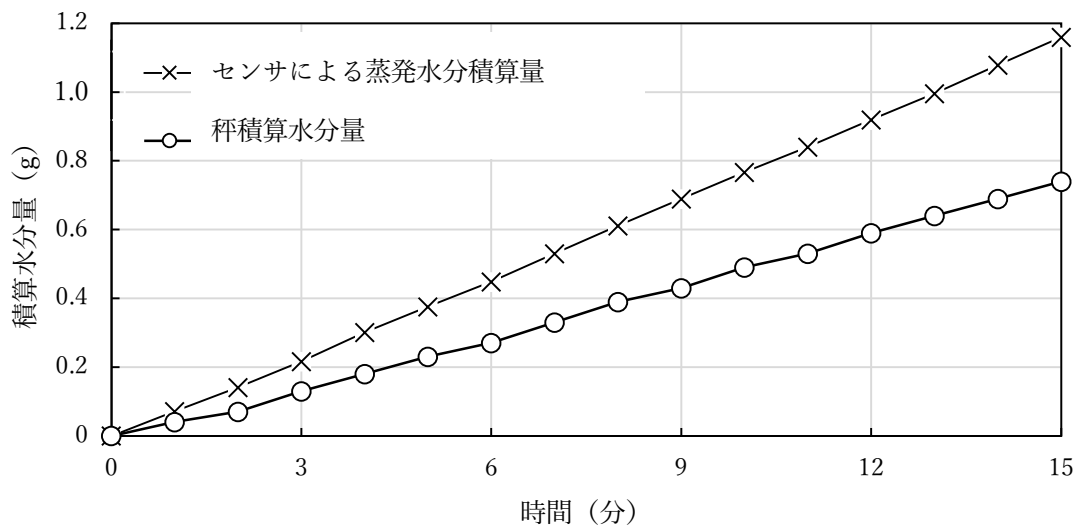


Fig.3.4.2 対策前：冷房ON時の秤積算水分減少量とセンサによる蒸発水分積算量

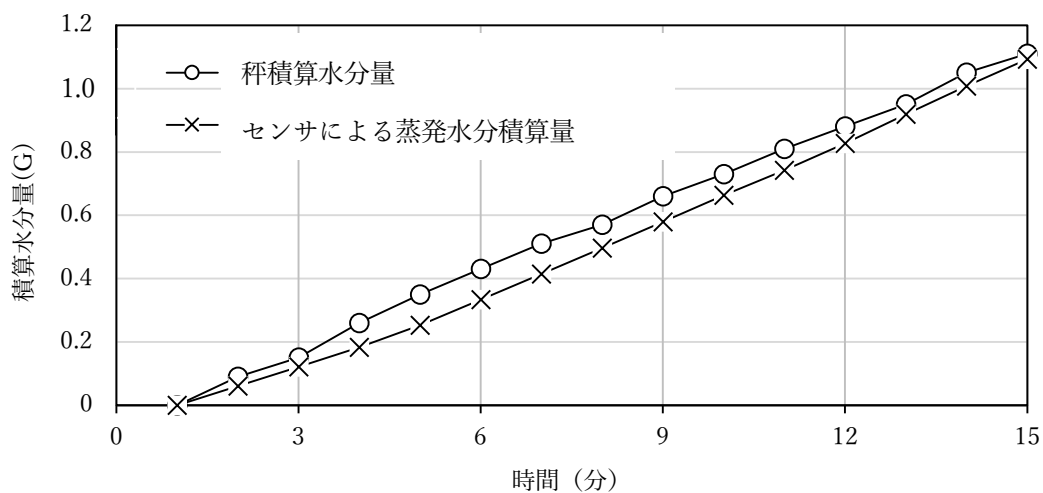


Fig.3.4.3 対策後：冷房ON時の秤積算水分減少量とセンサによる蒸発水分積算量

最終的に決定したセンサ位置で、計測した結果を Fig.3.4.4 に示す。時間経過と共にほぼ、同一の水分量が計測され単調増加する結果が得られた[36]。

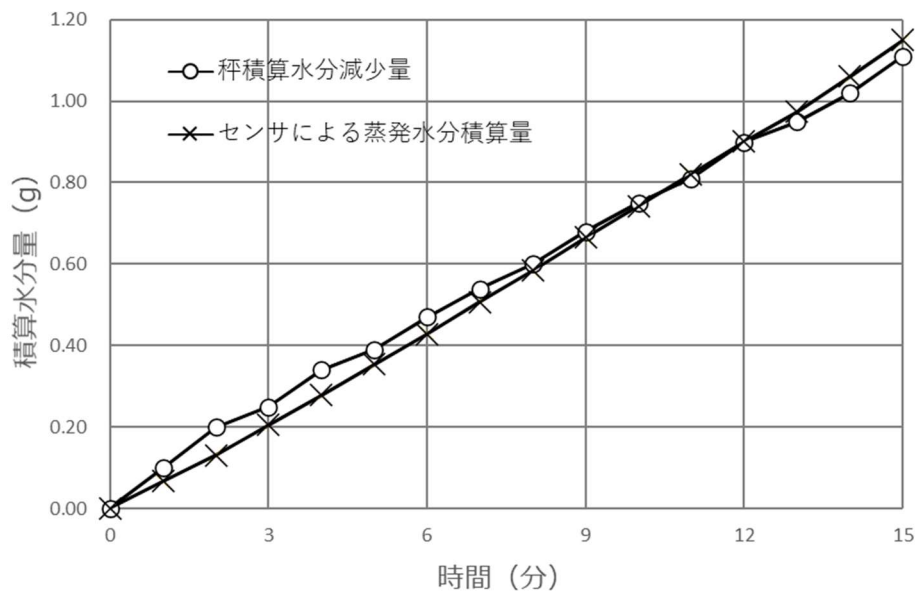


Fig.3.4.4 秤積算水分減少量とセンサによる蒸発水分積算量

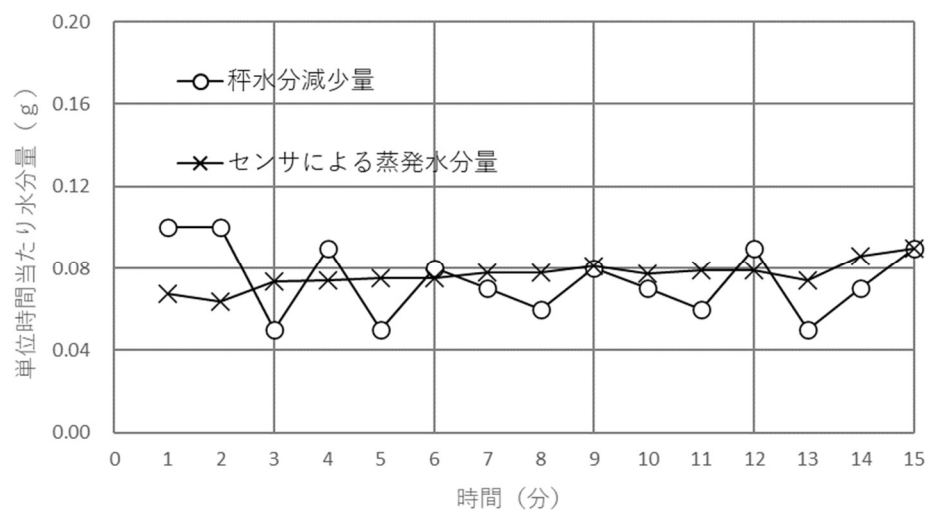


Fig.3.4.5 毎分の秤水分減少量とセンサによる蒸発水分量

Fig.3.4.5 に、毎分の秤水分減少量とセンサによる蒸発水分量を図示し、Fig.3.4.6 には、Bland-Altman 分析の結果を示す。計測開始 1, 2 回目こそ差が大きいですが、実験に慣れてきた 3 回目以降は安定した計測結果となっており、ベースとなる単位時間あたり（毎分）の蒸発水分量も、毎回正しく計測出来ていると考えられる。

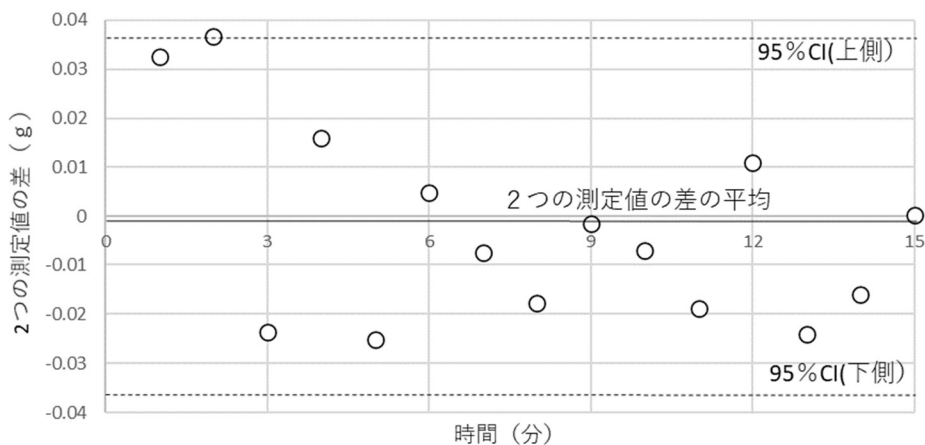


Fig.3.4.6 Bland-Altman 分析の結果

繰り返し誤差も把握するため、3 回の繰り返し実験を行い、回帰分析した結果を Fig.3.4.7 に示す。相関係数  $r$  は、 $r=0.99$  という極めて強い相関を示しており、(3)式の計測原理が成立することが確認できた[36]。

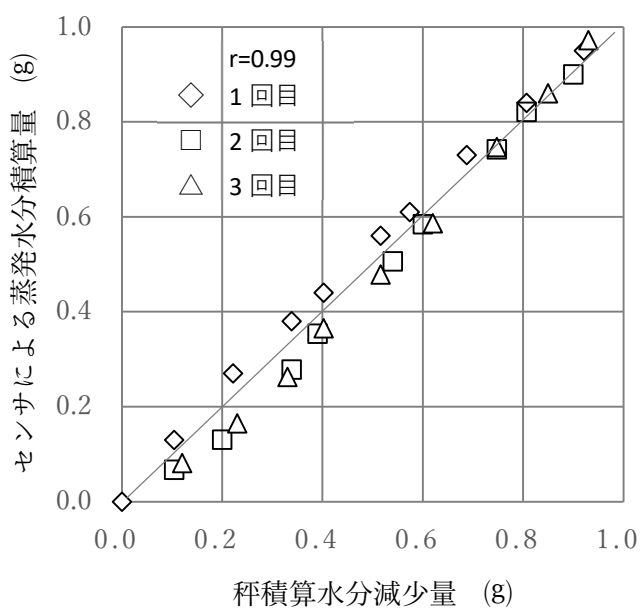


Fig.3.4.7 秤積算水分減少量とセンサによる蒸発水分積算量

### 3.5 まとめ

最終的に創出したヘルメット型発汗量計測デバイス構造により、2つの温湿度センサで計測され、原理式1(3)で求めた蒸発水分量（発汗量相当）は、電子秤による水分減少量との相関係数 $r$ が、 $r=0.99$ という極めて強い相関を示しており、導出した(3)式による計測原理が成立することが確認できた[36]。



参考文献

[35] Tetens,O., TetensÜbereinige meteorologische Begriffe , Z Geophys.,6,(1930),pp.297-309

[36]Tsukasa Kosuda, Yoshiaki Nakajo, Konosuke Sasagawa, Yuto Nishikai, Shunji Shimizu, Yoshinori Kumita, Toshihiko Kondo, Nobuaki Hashimoto, “Development of a helmet-type wearable device capable of measuring perspiration during various activities”, ICEP2019 Proceedings 2019, pp138-143



## 第4章

# 安静時におけるヘルメット型 発汗量計測デバイスの検証

#### 4.1 はじめに

第3章で頭部発汗量計測の原理確認ができたため、第4章ではヘルメット型発汗量計測デバイスをヒトに装着し、実際にヒトで発汗量が計測可能か検証を行うこととした。そのために、ヒトが行動下でも発汗計測ができるような無線機能付きのヘルメットの開発[36]を行ったうえで、ヘルメット型発汗量計測デバイスをヒトに装着し、実際に安静時にヒトで、頭部発汗量を計測し、頭部発汗量から全身発汗量の推定が可能か検証を行い、実用化の可能性を示すことを目的に実験を行った。

#### 4.2 実験環境の構築

計測データを外部 PC 等に無線伝送するシステムとして、小型の無線伝送システムを開発し、センサ以外のシステムはヘルメットのひさし部分に装着した。これにより計測データはケーブルレスで自動的に外部 PC にデータ転送されるようにした。尚、ファンは本来ヘルメット内の空調用のものであり、常時動作させることで頭部を空調させながら、かつ発汗量を計測することとしている。電源には充電式単三電池 3 本を使用しており、容量は 10.8Wh (3.6V × 3000mAh) で、ファンの電力は 0.65W (3.6V × 0.18A)、無線伝送等の回路系消費電力は 0.45W (3V × 0.15A) のため、約 10 時間の連続駆動が可能であり、通常の一日の作業中常時稼働させておくことが可能である。またファン付きヘルメットの自重 (567g) に、わずか 16g(2.5%重量増加)の部品の増加に抑えることができ、使用者にもほとんど意識させないウェアラブルデバイスとすることができた。無線機能を搭載したヘルメット型発汗量計測デバイスの構成を Fig.4.2.1 に、システム全体のブロック図を Fig.4.2.2 に示す。また、ヘルメット型発汗量計測デバイスに使用した部品の型番や特徴を Table 4.2.1 にまとめた。

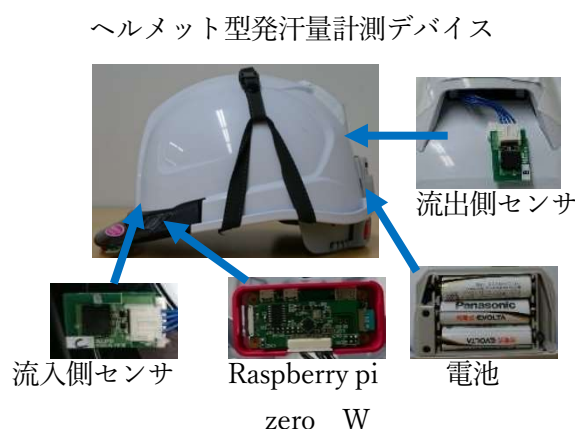


Fig.4.2.1 無線機能搭載ヘルメット型発汗量計測デバイスの構成

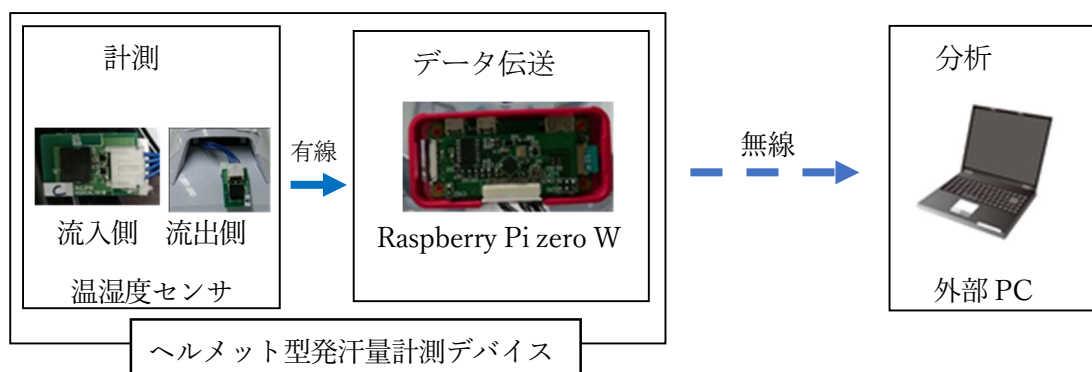


Fig.4.2.2 システム全体のブロック図

Table 4.2.1 実験装置構成表

機器・デバイス	型番・特徴・仕様
ヘルメット	メーカー:株式会社トーヨーセフティ 型番:394F Windy Helmet 重量:567g ・送風機内蔵ヘルメット (ファンモーター採用) ・ファンモーター消費電力 3.6V×0.18A
流入・流出 温湿度センサ	メーカー:アルプスカンパニー 型番:HSHCAL 101B ・静電容量式デジタル温湿度センサ ・センサ出力の揃ったペアセンサを採用、最も再現性の得られる場所にセンサを配置、センサ出力方式はノイズに強い I <sup>2</sup> C バス出力方式を選択
高精度 電子台秤	メーカー:新光電子株式会社 型番:FJ-150K ・最小表示:1g 再現性 (σ):0.7g
PC	機器:Raspberry Pi zero W ・無線方式 Wi-Fi ・システム消費電力 3V×0.15A
電源	単三電池 3本 電池容量 3.6V×3Ah (ヘルメットのファン電源と共用)

### 4.3 ヒトによる基礎検証実験

原理検証実験では、ヘルメット型発汗量計測デバイスで、布を張り付けたマネキンで蒸発水分量計測の検証を行ったが、ヒトでも同様に頭部全体の発汗量に相当する頭部全体からの蒸発水分量（以降、頭部発汗相当量と表記）が正確に計測できるか、本実験に先立ち、頭部発汗量と頭部発汗相当量の関係を明確にする基礎検証実験を行った。

高精度電子台秤で体重を計測し、その減少量を全身発汗量とみなして計測する方法は、古くから最も一般的な手法であると先行研究[44]で述べられている。先行研究[44]では、体表の各箇所（前額、胸部、背部、大腿）の局所発汗量に、体表面積比による重み付けを行い、全身発汗量を算出し体重減少量と相関を取ると、有意な線形の相関があったことが述べられており、これは特定箇所の体表の面積と全身発汗量の間線形の相関があることを示している。従って、本研究では、頭部発汗相当量からでも全身の発汗量が推定できるという仮説を立案し、これを実証することとした。

本実験は、人の頭部に装着したヘルメット型発汗量計測デバイスから排出された頭部発汗量を強力な水分吸収特性を有する五酸化リン（ $P_2O_5$ ）吸着剤で吸着させ、吸着シートの重さを電子秤で3分毎に測定することで行った。ヘルメット型発汗量計測デバイスで計測される頭部発汗相当量は1分毎にWiFiを経由し外部PCにデータが記録されるようにした。

また実験に先立ち Table 4.2.1 に示される高精度電子台秤を校正してから使用した。また既存の研究[8]を参考にし、被験者には気温  $30 \pm 1^\circ\text{C}$ 、湿度  $35 \pm 10\%$ 、の実験環境の部屋に30分前に入室してもらい、体を環境に適応してもらってから測定を開始した。計測誤差の大きな要因と考えられる体表面の無効発汗の影響を少なくするため、被験者には実験用シャツとズボンには木綿性を着用してもらい、体重測定時にはそれらを脱ぎ、体表面の汗をぬぐってから下着とヘルメットのみで体重を計測した。体重減少量は精密電子台秤で6分毎に計測した。15分間計測し結果を比較した。基礎検証の実験フローを Fig.4.3.1 に示す。

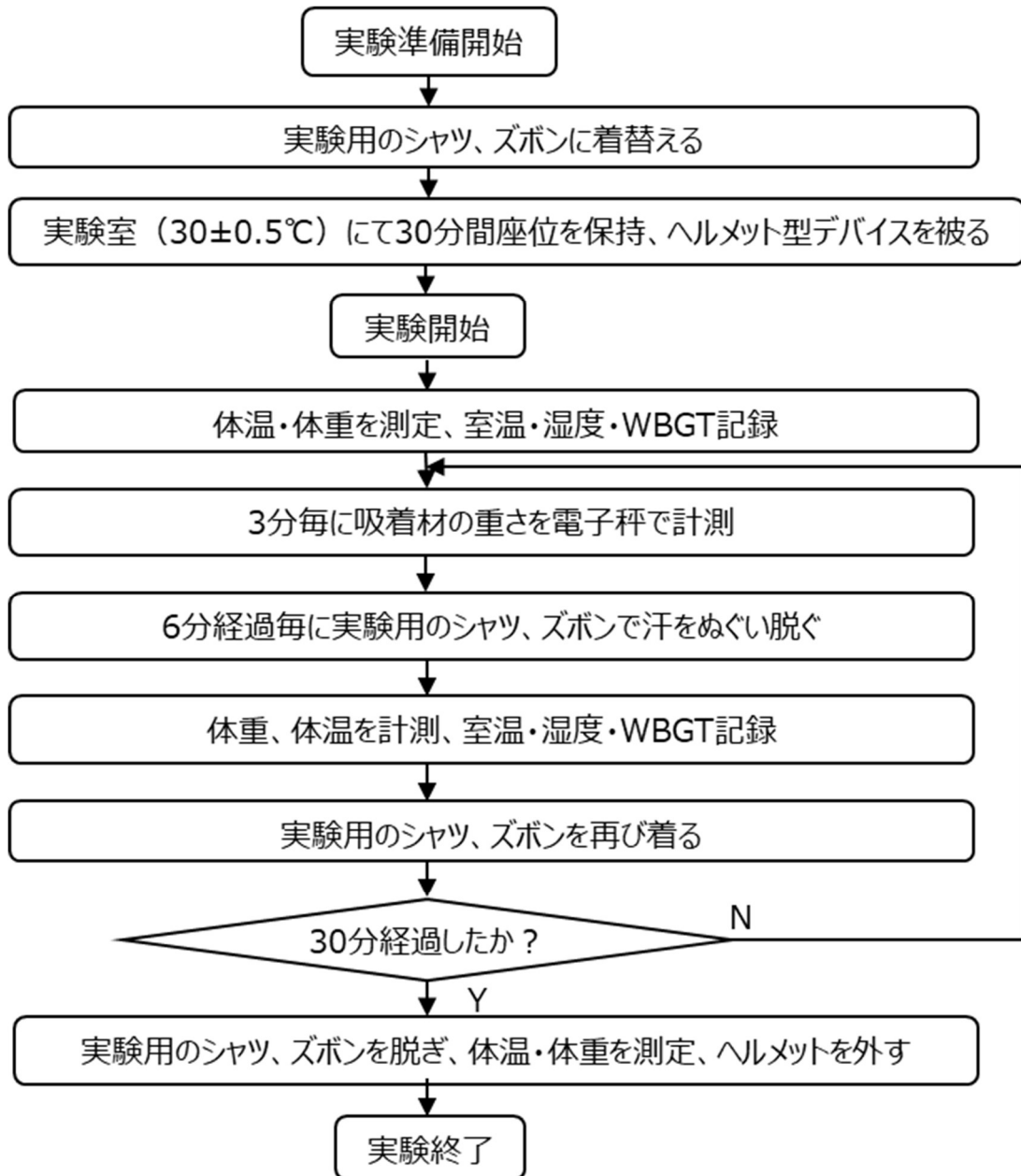


Fig.4.3.1 実験フロー

秤積算水分吸着量とヘルメット型発汗量計測デバイスで計測された頭部発汗積算相当量との相関を Fig.4.3.2 に示す。前額等人体他部位の発汗量を直接計測した既存研究[44]と同様に、相関係数  $r$  は、 $r=0.97$  と強い相関を示し、時間経過とともに頭部発汗積算相当量は単調に線形で増加しているため、ヘルメット型発汗量計測デバイスで頭部発汗相当量は正確に計測でき、ヒトにおける計測でも計測原理が成り立つことが確認できた。[46]

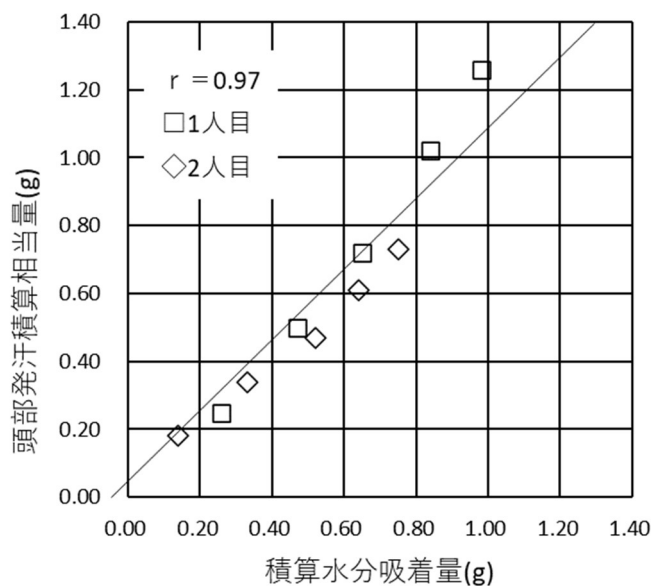


Fig.4.3.2 積算水分吸着量と頭部発汗積算相当量

#### 4.4 安静時実験

基礎検証実験で良好な結果が得られたため、安静時のヒトでの計測実験に移行した。第3章の実験と同様に、実験に先立ち高精度電子台秤を校正してから使用した。また既存の研究[8]を参考にし、被験者には  $30 \pm 1^\circ\text{C}$  の実験環境に 30 分前に入室してもらい、体を環境に適応してもらってから測定を開始した。計測誤差の大きな要因と考えられる体表面の無効発汗の影響をなくするため、被験者には実験用シャツとズボンには木綿性を着用してもらい、体重測定時にはそれらを脱ぎ、体表面の汗をぬぐってから体重を計測した。以上の点に注意したうえで、開発したヘルメット型発汗量計測デバイスを引き続き  $30 \pm 1^\circ\text{C}$  の室内環境下で頭部に装着し、ヒトの体重減少量を精密電子台秤で 6 分毎に計測した。ヘルメット型発汗量計測デバイスで計測される頭部発汗相当量（蒸発水分量）は 1 分毎に Wi-Fi を経由して、外部 PC にデータが記録される。30 分間計測・積算し、結果を比較した。実験環境を Fig.4.4.1 に、ヒト検証実験の実験フローを Fig.4.4.2 に示す。





Fig.4.4.1 ヒト実験環境

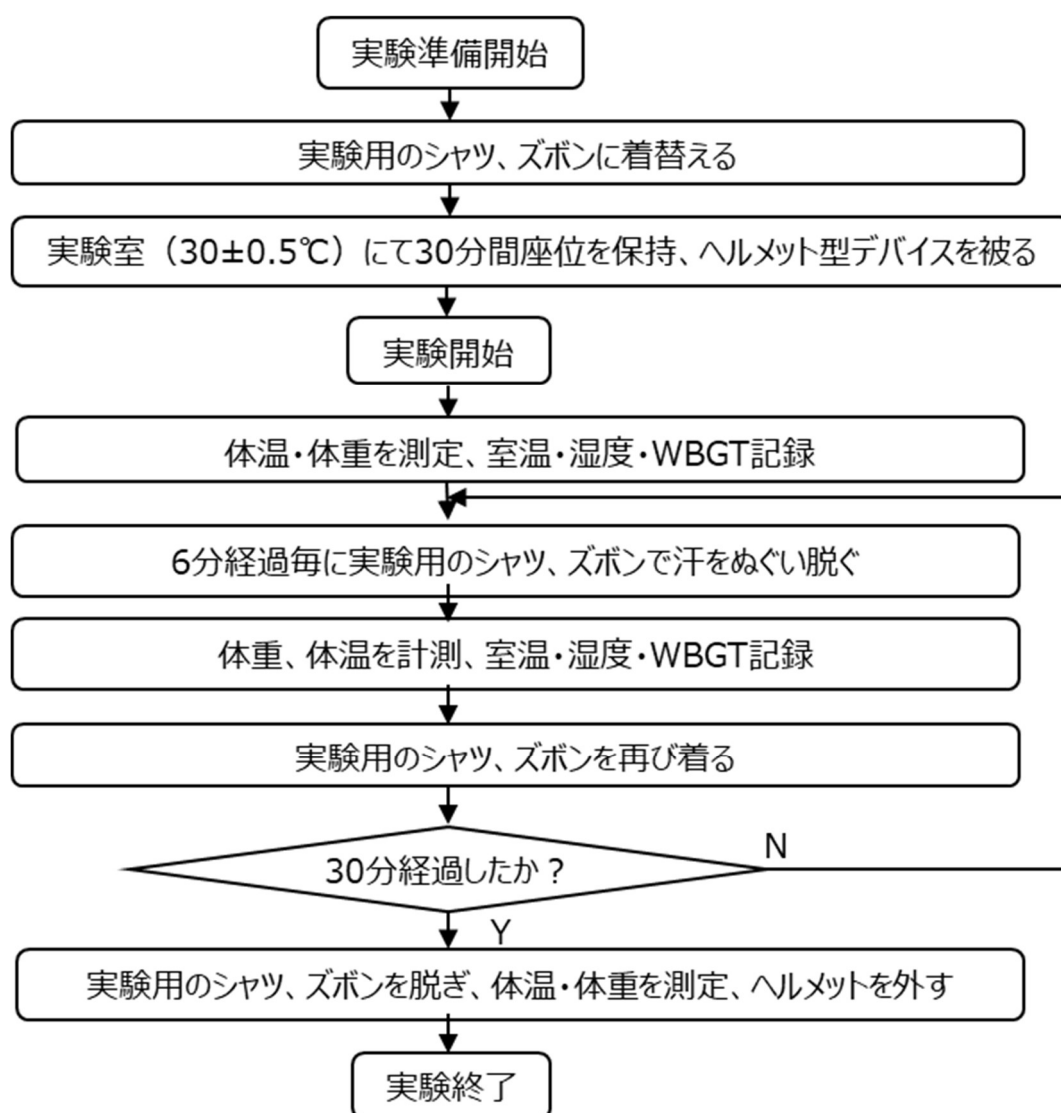


Fig.4.4.2 実験フロー

## 4.5 実験結果と考察

### 4.5.1 単回帰分析

被験者は10名で、男性20~22歳、頭髪は短髪（坊主刈り）から長髪の者まで含んでいる。被験者情報と30分間の積算発汗計測結果をTable 4.5.1にまとめた。ヒト実験における積算体重減少量と開発したヘルメット型発汗量計測デバイスによる頭部発汗積算相当量の計測結果の時間変化の例をFig.4.5.1~4.5.3に示す。

Table 4.5.1 被験者情報と30分間の積算発汗計測結果

人	性別	年齢	身長[cm]	体重[kg]	積算体重 減少量[g]	頭部発汗 積算相当量 [g]
A	male	22	174	74.8	60.0	2.93
B	male	22	160	46.2	78.0	4.54
C	male	22	165	59.1	75.0	3.59
D	male	22	165	59.8	110.0	3.89
E	male	22	176	61.3	43.0	1.93
F	male	20	172	88.8	97.0	2.42
G	male	22	169	55.7	39.0	2.15
H	male	22	173	52.4	27.5	2.26
I	male	20	169	76.4	96.0	6.83
J	male	22	168	88.3	111.4	6.13

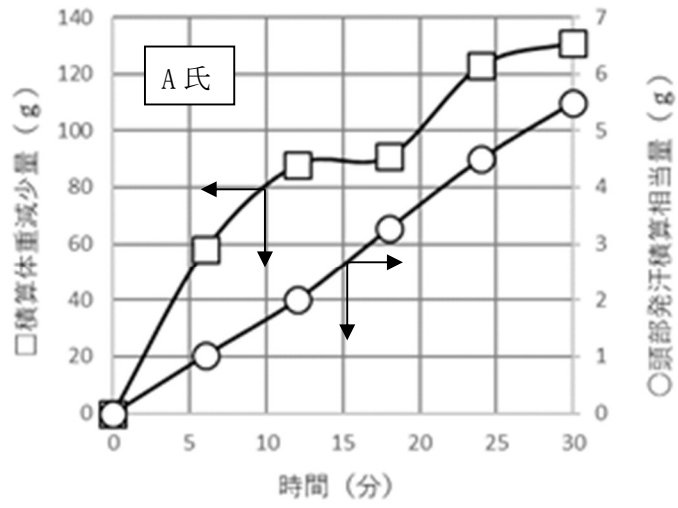


Fig.4.5.1 積算体重減少量と頭部発汗積算相当量(A 氏)

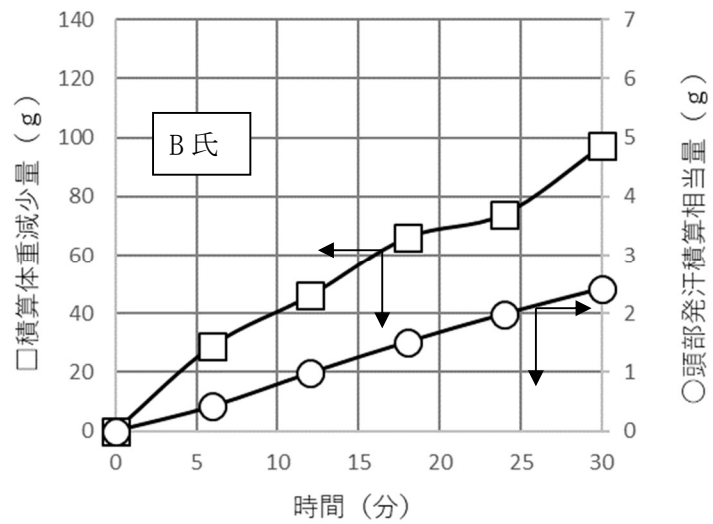


Fig.4.5.2 積算体重減少量と頭部発汗積算相当量 (B 氏)

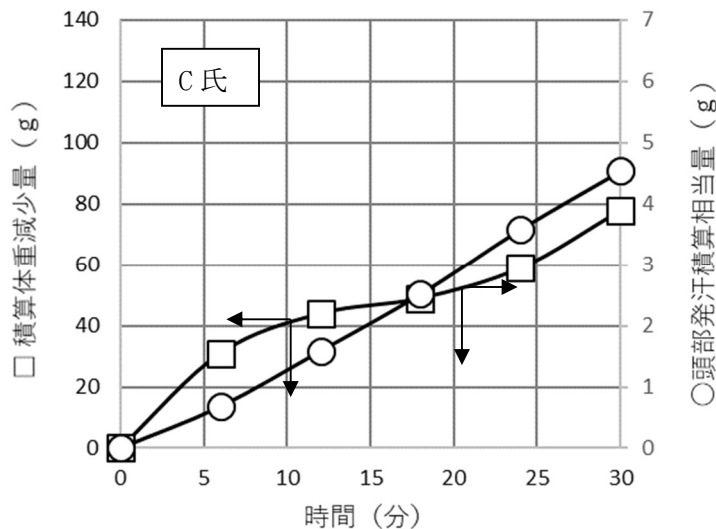


Fig.4.5.3 積算体重減少量と頭部発汗積算相当量 (C氏)

人によって発汗量の多い人と少ない人が存在し、既存報告[3]と同様に、特定の人でも、測定日、季節などによって、計測値は大きく異なることが判明した。しかし、被験者や頭髪量の差、測定時期等が変動しても、積算体重減少量と開発したヘルメット型発汗量計測デバイスによる頭部発汗積算相当量とも、時間とともに徐々に増加することは変わらなかった。このことを、より詳細に分析する為、ヒト実験における積算体重減少量と開発したヘルメット型発汗量計測デバイスによる頭部発汗積算相当量について、被験者10名のデータにおいて、回帰分析を行った。結果をFig.4.5.4に示す。積算体重減少量は、全身発汗量に相当すると考えられるため、Fig.4.5.4のグラフの傾きから、全身発汗量 $P(g)$ は、頭部発汗積算相当量を $Q(g)$ とした場合、本実験環境下では、

$$P(g)=20.4\times Q(g) \quad (4)$$

の関係式で表されることがわかった。この時の、相関係数 $r$ は $r=0.75$ であり、両者において十分な相関関係が認められた[36]。

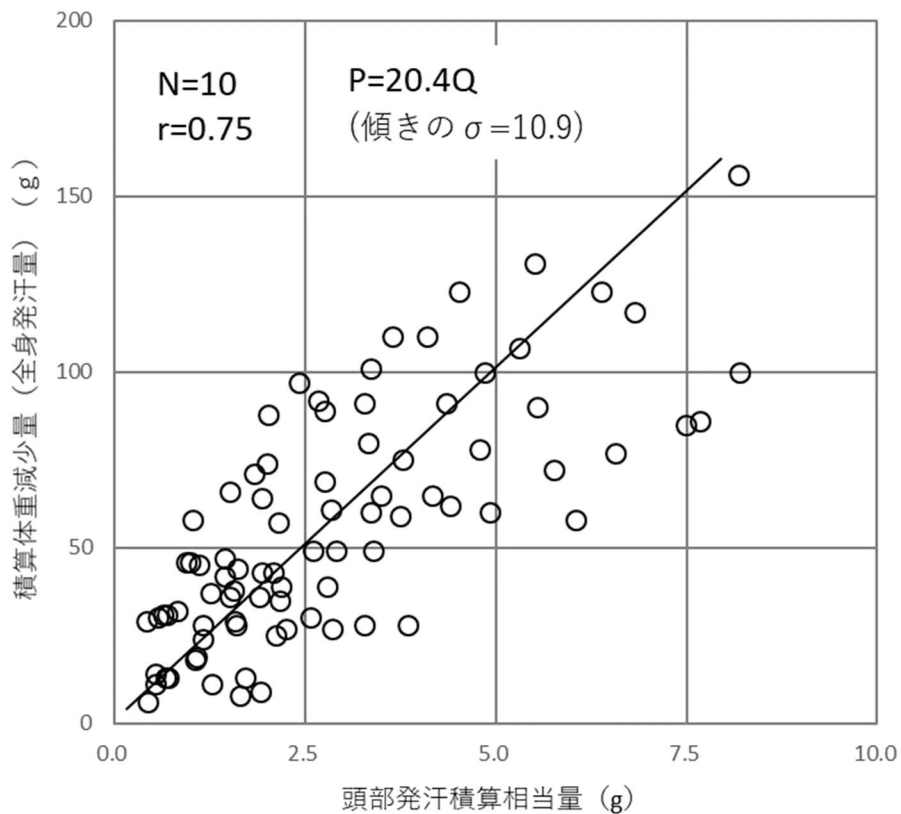


Fig.4.5.4 積算体重減少量（全身発汗量）と頭部発汗積算相当量

体表面積に占める頭部表面積の割合は、おおよそ7.2%である[40]が、体重減少量から得られた発汗量と本デバイスで計測された頭部発汗積算相当量の比は約5%であり頭部発汗積算相当量の方が少ない結果が得られた。これは、呼気中の水蒸気による体内水分量の減少と頭部及びバンド（留め具）に水膜として残っている無効発汗[41]によるものと考えられる。参考までに、Table 4.5.2 に全身表面積と各部位ごとの面積を示す。

Table 4.5.2 参考：各部位の体表面性に占める表面積割合[40]

	男性 (N=24)		女性 (N=21)		全体(N=45)	
	表面積		表面積		表面積	
	cm <sup>2</sup>	%	cm <sup>2</sup>	%	cm <sup>2</sup>	%
頭部	1187.4	7.1	1121.8	7.3	1154.6	7.2
耳	86.3	0.6	75.2	0.5	80.7	0.6
首	617.4	3.7	462.9	3.0	540.1	3.4
胸部	1047.0	6.2	980.1	6.4	1013.5	6.3
腹部	1068.7	6.3	797.5	5.2	933.1	5.8
背中	1216.3	7.2	1126.4	7.4	1171.4	7.3
腰椎	521.7	3.1	346.6	2.3	434.2	2.7
上腕	1698.8	10.0	1528.4	10.0	1613.6	10.0
下腕	991.6	5.9	882.7	5.7	937.2	5.9
手	834.0	5.0	732.7	4.8	783.3	4.8
臀部	1357.7	8.0	1259.3	8.2	1308.6	8.2
太もも	2888.7	17.1	2983.9	19.5	2936.3	18.3
脚	2135.2	12.7	1961.5	12.8	2048.4	12.8
足	1198.2	7.1	1072.0	7.0	1135.0	7.1
全身	16848.9	100	15331.1	100	16090	100

また部位による発汗能、温熱性発汗発現の違いを Fig.4.5.5 に示すが、額と脇は発汗増加能が他の部位より低いにもかかわらず、発汗発現温度はかなり低い[42]。これは脳を冷やすためと考えられている。

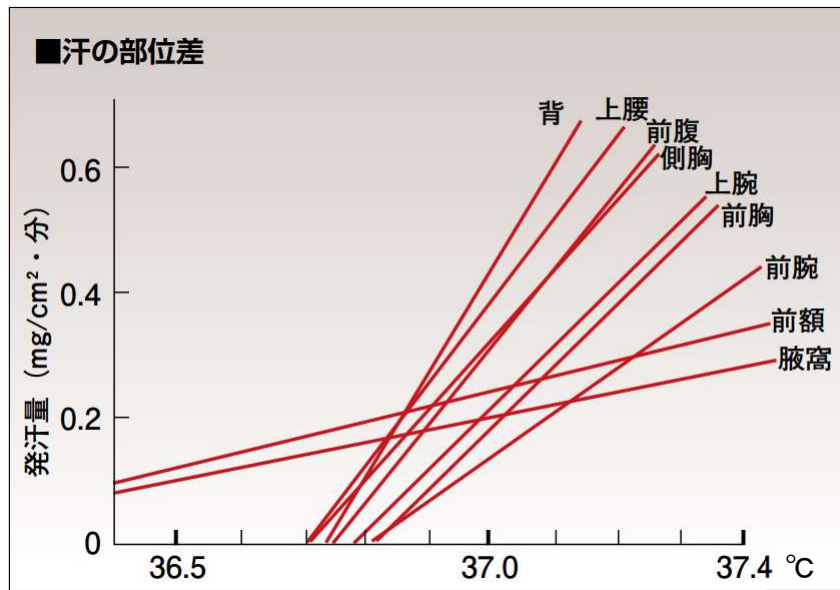


Fig.4.5.5 温熱性発汗発現の部位差と発汗能力の関係[42]



#### 4.5.2 重回帰分析

さらに精度良く全身発汗量を予測するため、事前に得た被験者の個人情報と、実験時の環境情報を加え、積算体重減少量（全身発汗量）に対する各要因の重回帰分析を行ったため、その結果を述べる。

Table 4.5.3 重回帰分析結果

回帰統計						
重相関 R	0.939232					
重決定 R <sup>2</sup>	0.882157					
標準誤差	11.62514					
観測数	50					
分散分析表						
	自由度	変動	分散	分散比	有意 F	
回帰	10	39455	3945.5	29.19479	4.69E-15	
残差	39	5270.615	135.144			
合計	49	44725.62				
目的変数は積算体重減少量（全身発汗量） *P<0.05						
	係数	標準誤差	t	P-値	下限 95%	上限 95%
切片	1102.658	290.3202	3.798077	0.000498*	515.4303	1689.886
頭部発汗 積算相当量	13.28834	3.99997	3.322109	0.001949*	5.197633	21.37904
体温	-15.378	6.117292	-2.51385	0.016181*	-27.7513	-3.00456
年齢	2.400082	4.154826	0.577661	0.566813	-6.00385	10.80401
身長	-2.62784	0.576459	-4.55859	4.99E-05*	-3.79384	-1.46184
体重	0.931997	0.167678	5.55824	2.13E-06*	0.592835	1.271159
頭囲	0.0212	1.497859	0.014154	0.988779	-3.0085	3.050906
髪	-35.1362	13.19737	-2.66236	0.011214*	-61.8304	-8.44202
経過時間	0.242396	0.515547	0.470174	0.64085	-0.8004	1.285188
温度	-6.74017	6.688807	-1.00768	0.31982	-20.2696	6.78922
湿度	2.569546	0.895633	2.868973	0.006616*	0.757958	4.381134

開発したヘルメットで得られた頭部発汗積算相当量と、個人・環境情報から求めた重回帰式で、全身発汗量を推定した場合、重相関係数Rは、 $R=0.94$ という高い相関関係で推定できることがわかった。相関図をFig.4.5.6に示す。

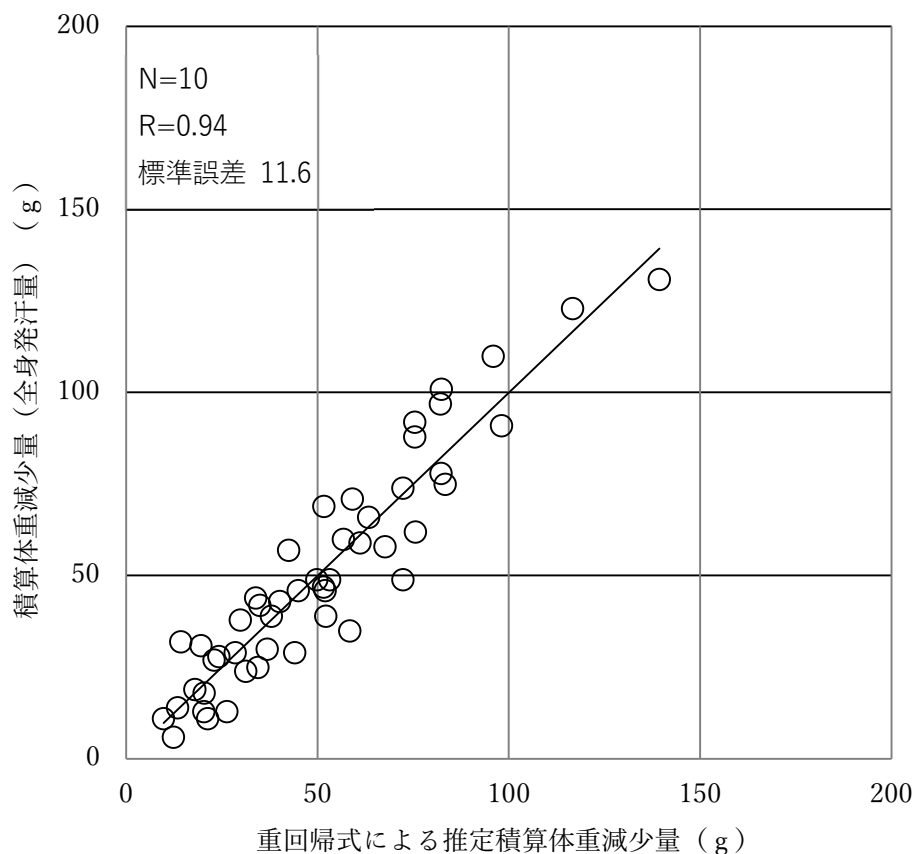


Fig.4.5.6 重回帰式による推定積算体重減少量

分析結果から全身発汗量（積算体重減少量）には、頭部発汗積算相当量以外に、身長 (-)、体重(+)、湿度(+)、体温(-)、髪(-)、が影響を与えているという結果が得られた。湿度(+ )及び身長 (-)、体重(+ )が影響を与えているという分析結果は、先行研究[45]でも述べられている傾向と同様であり、妥当な結果であると考えられる。体温(-)、髪(-)の影響については、今後の実験での傾向を、継続し確認していく。

#### 4.6 まとめ

本章では、以下の内容を述べた。

開発したヘルメット型発汗量計測デバイスをヒトに装着し、実際にヒトで発汗量が計測可能か検証を行った。そのために、ヒトが行動下でも発汗計測ができるような無線機能付きのヘルメットの開発を行った。

まずファン付きヘルメットの空気流入部と流出部に温湿度センサをつりつけヘルメット内部での発汗相当量を計測するシステムを考案し、物質収支から導かれる計測原理式が成立することを実証した。

次に無線機能を搭載したヘルメット型発汗量計測デバイスを開発し、10名の被験者に30°Cの環境の安静化で装着して実験を行った。ヒト検証実験の結果より、本実験環境下では、全身発汗量に相当する積算体重減少量は、開発したヘルメット型発汗量計測デバイスによる頭部発汗積算相当量の20.4倍になることがわかり、この時の相関係数  $r$  は、 $r=0.75$  と十分な相関があることが判明した[36]。

また計測時環境（温度、湿度）や個人情報（身長、体重、年齢）を加え重回帰分析することにより、重相関係数  $R$  は、 $R=0.94$  とさらに高い相関関係を得られることを確認できた。以上のことから、本研究によって開発されたヘルメット型発汗量計測デバイスで全身発汗量推定は可能であることが示唆された。

なお、本章の研究は、公立諏訪東京理科大学論理審査委員会の承認（承認番号 No16）を受けて実施した。

## 参考文献

- [36] Tsukasa Kosuda, Yoshiaki Nakajo, Konosuke Sasagawa, Yuto Nishikai, Shunji Shimizu, Yoshinori Kumita, Toshihiko Kondo, Nobuaki Hashimoto, "Development of a helmet-type wearable device capable of measuring perspiration during various activities", ICEP2019 Proceedings 2019, pp138-143
- [40] 藏澄他,日本人の体表面積に関する研究,Jpn.J.Biometeor.31(1) 5-29,1994
- [41] 窪田他,無効発汗と着衣のぬれを考慮した人体皮膚表面温度の予測,空気調和・衛生工学会論文集 33(137),9-17,2008
- [42] ヤクルトホームページ,発汗は身体にとって重要な「冷却システム」  
[https://www.yakult.co.jp/healthist/208/img/pdf/p20\\_23.pdf](https://www.yakult.co.jp/healthist/208/img/pdf/p20_23.pdf) (アクセス 2020年12月19日)
- [43] 鷹股他,水分摂取による熱中症予防 その生理的メカニズム,日生氣誌 41(1):55-59,2004
- [44] 山田他,暑熱環境における全身体重減少量と局所発汗量・局所蒸散量との関係,織消誌 Vol.53,pp126-133,2012
- [45] 堀江他,熱中症予防等に資する一般定期健康診断を通じた効果的な健康管理に関する研究,  
[https://www.mhlw.go.jp/seisakunitsuite/bunya/koyou\\_roudou/roudoukijun/rousai/hojokin/dl/28\\_14020201-01\\_SoG.pdf](https://www.mhlw.go.jp/seisakunitsuite/bunya/koyou_roudou/roudoukijun/rousai/hojokin/dl/28_14020201-01_SoG.pdf) (アクセス 2021年1月22日)
- [46] "Development of a Helmet Device Capable of Measuring Perspiration during Activity and the Possibility of New Index for the Early Detection of Heat Stroke", Tsukasa Kosuda, Konosuke Sasagawa, Kanako Minauchi, Nobuaki Hashimoto, Transactions of The Japan Institute of Electronics Packaging, Volume 13 Pages E19-018-1-E19-018-11, 2020  
Released: December 29, 2020

## 第5章

# 行動時におけるヘルメット型 発汗量計測デバイスの検証

## 5.1 はじめに

第4章で、開発したヘルメット型発汗量計測デバイスにおいて安静時ヒト検証実験で良好な結果が得られたため、本章では、実際の作業環境下で、行動中のヒトにヘルメット型発汗量計測デバイスを装着し、行動下でも頭部発汗相当量が計測でき、頭部発汗積算相当量から全身発汗量が推定できるのか確認を行った。この内容について述べる。

## 5.2 行動時発汗量計測の実験方法

開発したヘルメット型発汗量計測デバイスを用い、実作業環境かつ行動下で、男性26~65歳までの被検者で、ヒト検証実験を行った。被験者9名で、年齢・体格は極力ばらつかせ、測定回数も同じ回数になるよう実験計画を組んだ。実験場をFig.5.2.1 に示すが、上部及び側面からは、部分的に日光が入りまた窓も解放されていて、温湿度環境は概ね室外と同じになった。実験は8月に実施したが、実験期間の環境温度は30~34°C、WBGTは27~29°C、湿度は53~73%、風はエアコン等の強制的な風はない状態で、歩行によって受ける風のみという環境であった。



Fig.5.2.1 行動下発汗量計測実験場

次に実験の事前準備と実験手順について述べる。被験者には実験場（Fig.5.2.1）で日常着用している作業着で、ヘルメット型発汗量計測デバイス着用し、30分間実験場の周回コースを歩行してもらった（Fig.5.2.2）。歩行速度は概ね通常歩行に相当する $1.43 \pm 0.1 \text{ m/s}$ にコントロ

ールした。安静時と実験と同様にヘルメット型発汗量計測デバイスで計測される頭部発汗相当量（蒸発水分量）は1分毎にWiFi経由で外部PCに無線伝送され記憶した。また10分毎に一旦歩行をやめ、高精度電子台秤(Fig.5.2.3)で体重を計測し、体重減少量を把握し、後程頭部発汗積算相当量と比較した。体重計測時は、作業着は脱いでもらい頭部以外の汗をタオルで拭き、無効発汗の影響をなるべくなくした上で、下着とヘルメットだけの状態で計測した。使用した高精度電子台秤も先の安静時ヒト検証実験で使用したのと同じである。実験フローをFig.5.2.4に示す。



Fig.5.2.2 研究時の歩行状況



Fig.5.2.3 現場に設置した高精度電子台秤

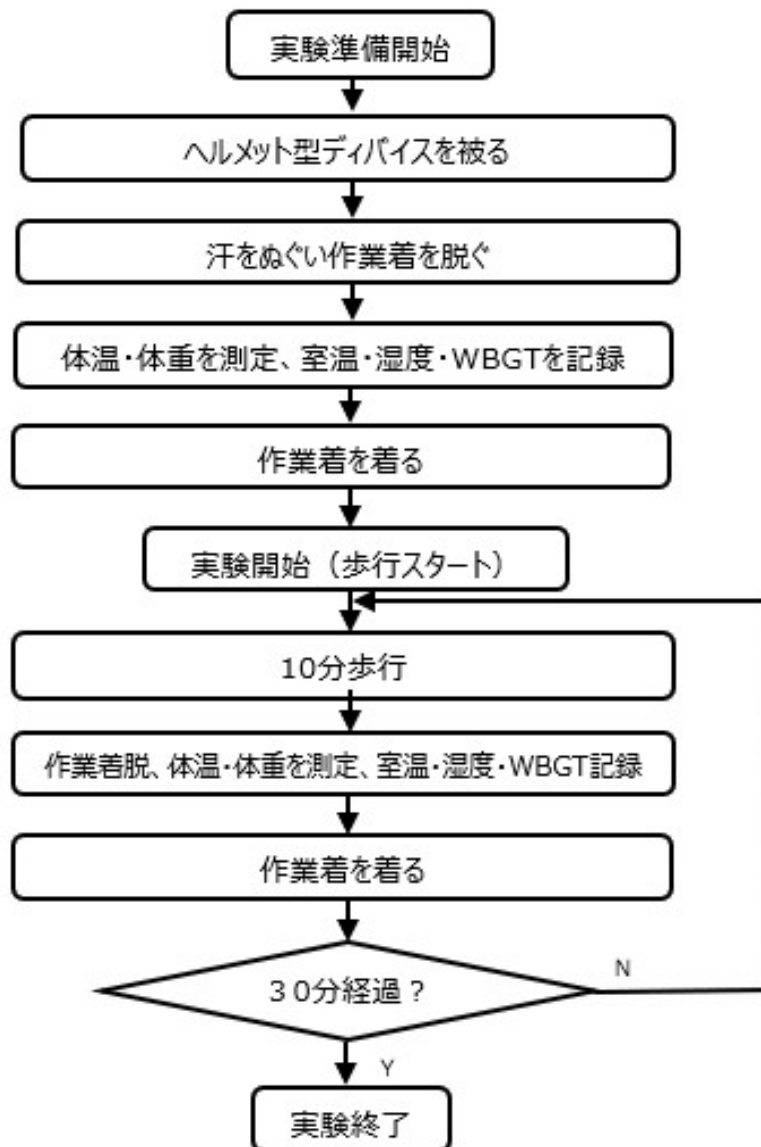


Fig.5.2.4 行動下ヒト検証実験フロー



### 5.3 実験結果と考察

#### 5.3.1 単回帰分析

被験者情報と30分間の積算発汗計測結果を、Table 5.3.1にまとめた。Fig.5.3.1に、被験者9名の、積算体重減少量と開発したヘルメット型発汗量計測デバイスによる頭部発汗積算相量との関係を示す。グラフの傾きから、全身発汗量 $P(g)$ は、頭部発汗積算相当量を $Q(g)$ とした場合、

$$P(g)=23.1\times Q(g) \quad (5)$$

で表されることがわかった。安静時に比べ行動下では回帰式の係数が若干大きくなった (20.4→23.1：安静時実験→行動時実験、以下同じ[36],[50]) が、これは暑熱下での歩行による運動で、呼気量が増加し、呼気水分放出量が増加したことと、頭部の無効発汗量[41] (汗水膜量)が増加したためと考えられる。また相関係数 $r$ は、 $r=0.87$ [50]で十分な相関関係が得られた。環境 (30°C→30~34°C)、人(20~22歳→26~65歳)、動作 (安静→歩行) において、実際の労働条件を模すため、発汗に寄与しそうなパラメータを大きく変化させたにも関わらず、前報の安静時の実験結果( $r=0.75$ [36])より高い相関結果が得られた。暑熱下の歩行では、安静時に対し、積算体重減少量と頭部発汗積算相当量がそれぞれ倍以上に増加しており、安定した発汗継続により、安静時にはばらつきに埋もれていた両者の関係性が、明確に表れたのではないかと考えられる[50]。

Table 5.3.1 被験者情報と 30 分間の積算発汗計測結果

人	性別	年齢	身長[cm]	体重[kg]	積算体重 減少量[g]	頭部発汗 積算相当量 [g]
K	male	26	168	67.1	204	15.4
L	male	31	172	68.1	275	8.4
M	male	37	173	62.2	215	4.2
N	male	38	170	55.9	122	5.5
O	male	42	179	88.1	298	14.1
P	male	44	170	68.4	329	19.5
Q	male	45	186	97.4	259	12.6
R	male	58	160	67.4	203	10.4
S	male	65	171	75.5	189	5.5

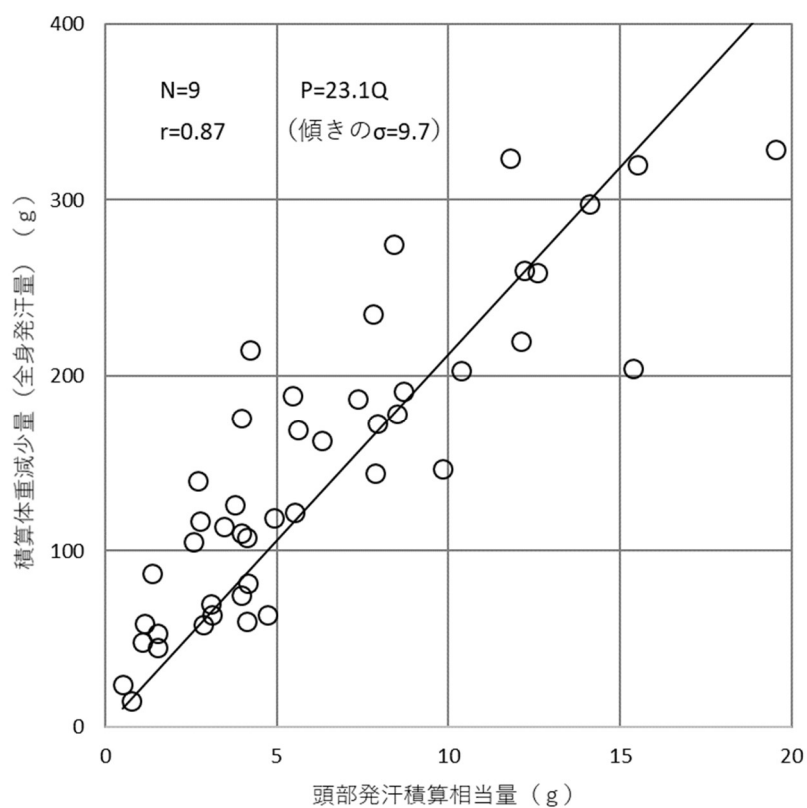


Fig.5.3.1 積算体重減少量 (全身発汗量) と頭部発汗積算相当量

先の回帰分析結果において、十分な相関は得られているが、さらに精度良く全身発汗量を推定するため、いくつかの考察を行った。分散図において、何点か外れ値が観察されるため、測定誤差として問題がないか絶対信頼性を確認するため、積算体重減少量と頭部発汗積算相当量の間でBland Altman分析を行ったため、結果をFig.5.3.2に示す。頭部発汗積算相当量は、23.1倍して扱った。

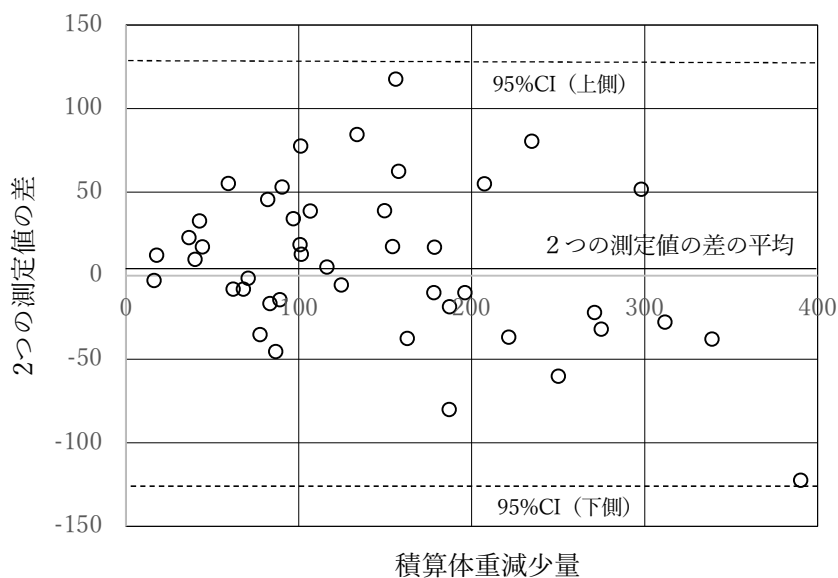


Fig.5.3.2 Bland-Altman分析の結果

始めは体重減少量が多くなるにつれて、ばらつきが増大している傾向がみられるが、後半はそのような傾向はみられず、特定要因に起因してばらつきが増大しているのではない、と考察する。

### 5.3.2 重回帰分析

さらに精度良く全身発汗量を予測するため、第4章と同様に、事前に得た被験者の個人情報と、実験時の環境情報を加え、積算体重減少量（全身発汗量）に対する各要因の重回帰分析を行った。結果をTable 5.3.3及びFig.5.3.3に示す。

Table 5.3.3 重回帰分析結果(11因子)

回帰統計						
重相関 R	0.971356					
重決定 R <sup>2</sup>	0.94353					
標準誤差	23.30163					
観測数	45					
分散分析表						
	自由度	変動	分散	分散比	有意 F	
回帰	11	299393.1	27217.55	50.12755	2.3E-17	
残差	33	17917.88	542.966			
合計	44	317311				
目的変数は積算体重減少量 (全身発汗量) * P<0.05						
	係数	標準誤差	t	P-値	下限 95%	上限 95%
切片	-1900.51	907.5903	-2.09402	0.04402*	-3747.02	-54.0066
頭部発汗 積算相当量	9.540059	1.745768	5.46468	4.7E-06*	5.988266	13.09185
体温	19.34551	18.32588	1.055639	0.298801	-17.9388	56.6298
年齢	-0.23713	0.515804	-0.45972	0.64873	-1.28654	0.812284
身長	0.168317	1.829286	0.092012	0.927245	-3.55339	3.890027
体重	0.759843	1.104022	0.68825	0.496105	-1.48631	3.005993
頭囲	2.557906	3.397434	0.752893	0.456852	-4.35423	9.470039
髪	13.18963	11.13437	1.184587	0.244642	-9.46341	35.84268
運動習慣	-0.09527	7.045471	-0.01352	0.989292	-14.4294	14.23884
経過時間	4.886217	0.751547	6.50154	2.2E-07*	3.357182	6.415252
温度	27.11123	12.98518	2.08786	0.04461*	0.692688	53.52978
湿度	0.869125	2.097165	0.414428	0.681242	-3.39759	5.135838

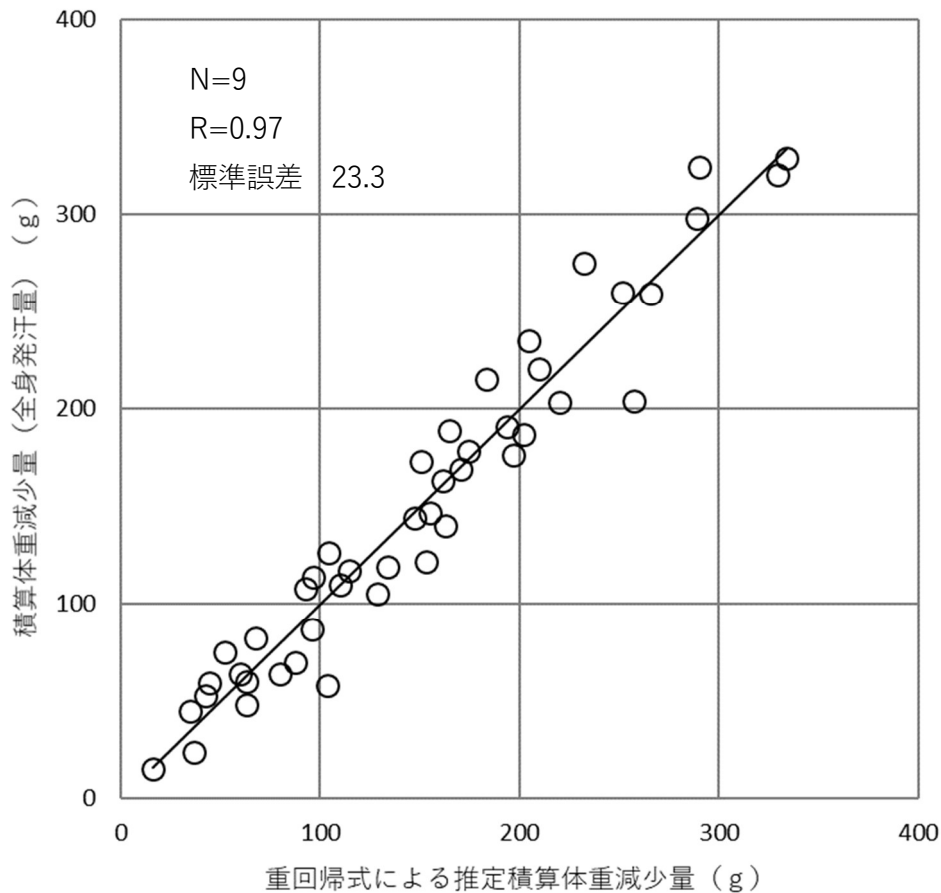


Fig.5.3.3 重回帰式による推定積算体重減少量

分析の結果、積算体重減少量（全身発汗量）は頭部発汗積算相当量以外に、経過時間、温度が強く影響(表中\*)していると判定された。行動経過時間が発汗量に影響すること[51]や温度が発汗量に影響していること[52]は知られており、それを裏付ける結果となった。重回帰式から予測される積算体重減少量と実際の積算体重減少量との重相関係数Rは、 $R=0.97$ [50]であり、より高精度で頭部発汗積算相当量から全身発汗量に相当する積算体重減少量を推定できることがわかった(Fig.5.3.3)。

本研究の結果、本研究で開発したヘルメット型発汗量計測デバイスを用いれば、十分な精度で全身発汗量が予測できることが判明したので、本研究成果を用いたシステムで発汗量を常に管理し、必要に応じて適宜作業員や作業管理者に水分喪失量としてフィードバックすることで、最大でこの値が体重の1.5%に到達した時点（厚労省指針[5]）を、熱中症のリスク管理指標として、作業中止とするアラートを発出できるようなシステムで、定期的な水分補給

を促し、緊急時は作業中断を促すことが、熱中症予防に有益と考えられる。

次に、Table 5.3.3の推定式は、精度を維持できる範囲で、どこまで簡略化できたるのかを見極めるため、因子数をどこまで減らせるか考察を行った。因子数を減らし分析した結果を下表に示すが、因子数を減らせば減らすほど推定精度は悪くなる。目安として、全因子を含んだ重回帰分析で、有意差有と出た項目のみを推定式に用いれば、Table 5.3.4に示すように少ない因子数でも比較的高い相関係数を得られることがわかった。今回の研究では、頭部発汗積算相当量、経過時間、温度の3因子で、重相関係数Rは、 $R=0.95$ となった。

重回帰分析の結果、3因子でも高い相関性が得られたが、必ずしも万人に共通する発汗に関する影響が把握できたわけではなく、あくまで分析対象の母集団に対しての結果であることに注意する必要がある。しかし現場単位で、作業する人、作業、環境等は毎日それほど変化しない場合は、今回述べた手法で、比較的高い精度で各人の全身発汗量が予測でき、その結果 精度の高い熱中症予防システムが提供できる可能性があると考えられる。

また同じ被験者に、同じ条件の暑熱曝露試験を夏と冬に実施した所、夏の方が有意に発汗量が多かったと報告されている[53]。これは被験者が暑熱適応し、熱放射能力が高まっている夏に比べて、熱放散を極力抑制する方向に順化している冬季に暑熱曝露を受けたのとは、同じ被験者でもその時期での暑熱適応能力の違いが出ると思われる。今回の研究では分析していない、季節も要因に入れた分析の必要があるかもしれないと考えられる。

Table 5.3.4 重回帰式の因子数と重相関係数の関係

目的変数	重回帰式の因子	因子数	重相関係数
体重減少量	頭部発汗積算相当量,年齢,身長,体重,頭囲,髪,運動習慣,経過時間, 体温,温度,湿度	11	0.97
体重減少量	頭部発汗積算相当量,年齢,身長,体重,頭囲,髪, 運動習慣,経過時間, 体温,温度,湿度	10	0.96
体重減少量	頭部発汗積算相当量,年齢,身長, <del>体重</del> ,頭囲, <del>運動習慣</del> ,経過時間, 体温,温度,湿度	6	0.96
体重減少量	頭部発汗積算相当量, <del>年齢</del> , <del>身長</del> , <del>体重</del> ,経過時間,温度	4	0.96
体重減少量	頭部発汗積算相当量, <del>体重</del> ,経過時間,温度	3	0.95
体重減少量	頭部発汗積算相当量,経過時間,温度	2	0.93

#### 5.4 安静時と行動時の全データを用いた分析

実際の作業環境では当然安静時も行動時も存在するため、前章の実験（安静）データと今回（行動時）のデータを合わせて分析を行った。その結果を述べる。まず 頭部発汗積算相当量と積算体重減少量の単回帰分析結果を Fig.5.4.4 に示す。

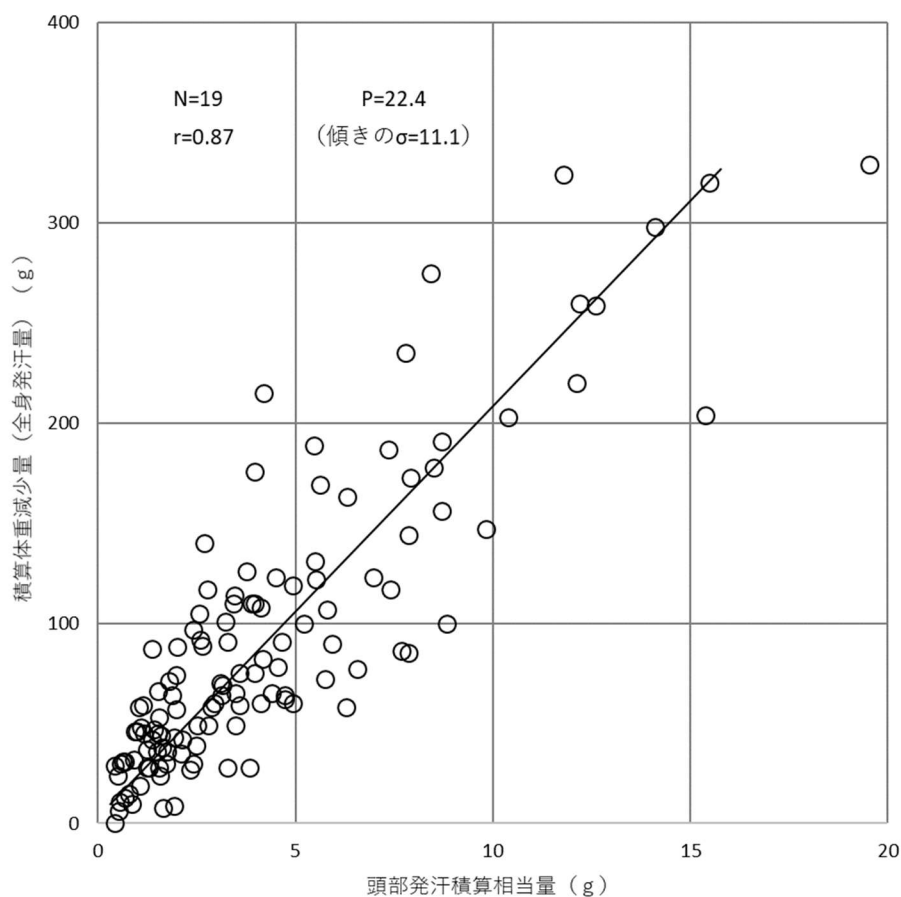


Fig.5.4.4 頭部発汗積算相当量と積算体重減少量（全身発汗量）

全身発汗量 $P(g)$ は、頭部発汗積算相当量を $Q(g)$ とした場合、

$$P(g)=22.4\times Q(g) \quad (6)$$

で 相関係数  $r$  は、 $r=0.87$  であった。安静時と行動合わせても、相関の結果として十分な相関が得られていると判断できる。（安静時： $r=0.75$  行動時： $r=0.87$ ） [36],[50]

次に 重回帰分析結果を示す。

Table 5.4.5 重回帰分析結果

回帰統計						
重相関 R	0.950516					
重決定 R2	0.903481					
標準誤差	26.25287					
観測数	95					
分散分析表						
	自由度	変動	分散	分散比	有意 F	
回帰	11	535473	48679.37	70.63032	2.26E-37	
残差	83	57204.71	689.2134			
合計	94	592677.7				
目的変数は積算体重減少量（全身発汗量） *P<0.05						
	係数	標準誤差	t	P-値	下限 95%	上限 95%
切片	203.2123	417.8531	0.486325	0.628019	-627.881	1034.305
頭部発汗 積算相当量	15.16858	1.320524	11.48679	7.83E-19*	12.54211	17.79504
体温	-14.6648	9.705289	-1.51101	0.134584	-33.9682	4.638651
年齢	0.453676	0.351722	1.28987	0.200678	-0.24589	1.153237
身長	-0.25772	0.623539	-0.41332	0.680435	-1.49792	0.982471
体重	0.85503	0.321678	2.658029	0.009427*	0.215225	1.494835
頭囲	-0.98118	1.991841	-0.4926	0.623597	-4.94287	2.980513
髪	-2.9345	9.660181	-0.30377	0.762061	-22.1482	16.27921
運動習慣	18.49789	6.678388	2.769814	0.006919*	5.214847	31.78094
経過時間	1.691096	0.452137	3.740225	0.000337*	0.791813	2.590379
温度	12.27279	4.033581	3.042655	0.003139*	4.250164	20.29542
湿度	-1.13304	0.477245	-2.37414	0.019898	-2.08226	-0.18382



この時の、重相関係数  $R$  は、 $R=0.95$  であり、 $0.9$  以上の高い相関関係を維持しており、安静時と行動時を含めた重回帰式からでも、問題無く全身発汗量を予測できていると考えられる。(安静時： $R=0.94$  行動時： $R=0.97$ ) この時の、実際の積算体重減少量(全身発汗量)と重回帰式より推定した全身発汗量の相関図を Fig.5.2.5 に示すが、統一の式で予測できる可能性は十分にあると考えられる。

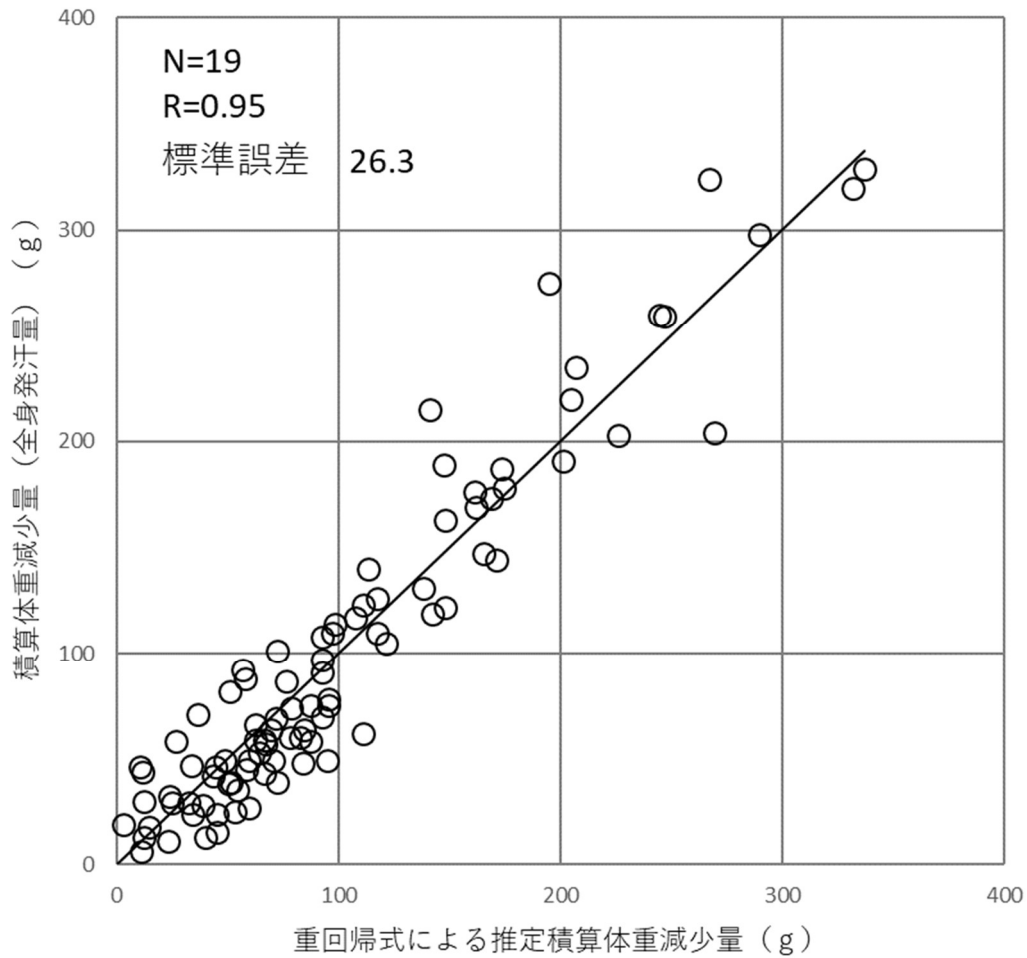


Fig.5.4.5 重回帰式による積算体重減少量

## 5.5 まとめ

第5章では、本研究で開発したヘルメット型発汗量計測デバイスで実労働環境に近い環境で行動下での実証実験（歩行下での発汗量計測実験）を行った。

その結果、頭部発汗積算相当量の23.1倍と、無効発汗を考慮すれば、安静時とほぼ同様の傾向が得られ、相関係数  $r$  は、 $r=0.87$  で安静時より十分な相関関係が確認できた。

さらに重回帰分析の結果、積算体重減少量には頭部発汗積算相当量に加え、行動時間と温度が強く影響していることが判り、重回帰式での推定値との重相関係数  $R$  は、 $R=0.97$  で、これらの値を推定式に導入すれば、全身発汗量に相当する積算体重減少量をより高精度に推定できることがわかった[50]。

以上のことから、本研究によって開発されたヘルメット型発汗量計測デバイスを用いることで、行動下でも全身発汗量を推定可能であり、暑熱下における作業中止の厚労省指針（体重の1.5%[5]）が、体重減少量の計測ではなく、本デバイスを用いた累積発汗量が、熱中症の早期罹患予測指標として有効に機能する可能性が高いことが示唆された。

なお、本章の研究実験は、公立諏訪東京理科大学論理審査委員会の承認（承認番号 No18）を受けて実施した。

参考文献

- [50]Tsukasa Kosuda, Konosuke Sasagawa, Kanako Minauchi, Nobuaki Hashimoto, “Estimation of whole-body perspiration in a hot environment using a perspiration measurement helmet device during various activities”, Trans. JIEP, vol.13 , 2020, E20-002-1-E20-002-4
- [51]渡井他,熱中症予防のための深部体温上昇判定システムの開発,生体医工学, 2016 -  
jstage.jst.go.jp
- [52]張他,環境温度が人体に与える暑熱ストレスに関する基礎研究,織消誌 Vol.55 No.10(2014)  
756-765
- [53]佐藤他,季節変動から見た発汗の動的特性,繊維学会誌 Vol.54,No6(1998)
- [54]小川徳雄,運動と発汗,体力科学 (1996) 45, 289-300
- [55]山越他,高温熱ストレス環境下におけるレーシングドライバー深部体温の連続計測と解析,  
生体医工学 48(3):269~280,2010



## 第6章

開発したヘルメット型デバイスの

課題対応と

統合型ウェアラブル熱中症予防

デバイスシステムの提案

## 6.1 はじめに

第5章までの検討で、開発したヘルメット型発汗量計測デバイスで、安静時のみならず行動下でも発汗量計測が可能であることを実証した。第6章では、開発したヘルメット型発汗量計測デバイスをより完成度の高いシステムとするために、課題を上げその対策を検討し、さらに開発したヘルメット型発汗量計測デバイスに、新たなセンサを搭載して、より高精度な熱中症早期罹患指標を得ることができないか検討を行い、それらの結果をまとめ、統合型ウェアラブル熱中症予防デバイスシステムとして提案を行う。

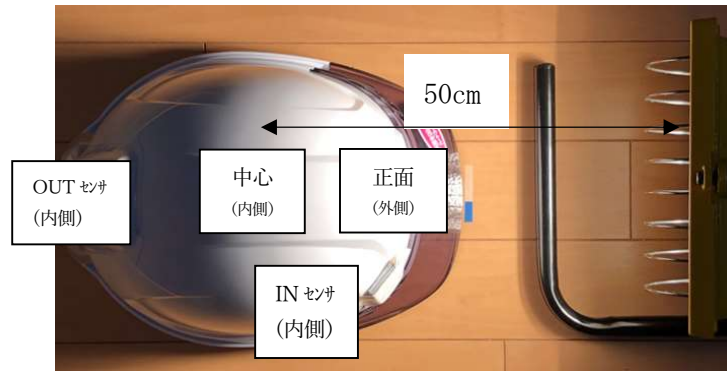
## 6.2 開発したヘルメットの課題対応

検討課題の中で、最も重要と考えられる、炎天下での熱輻射のセンサ影響に関して、検討した結果を述べる。

実際の建設現場では、屋外炎天下での作業も多くあり、ヘルメットのセンサ部付近に直射日光が当たった場合、太陽光の熱輻射によりヘルメット自体が高温となり、発汗計測のための温度センサが異常値を出してしまうことが想定され、対策が必要と考えられる。このため実験によりその程度を明確にし、対策を講じる。炎天下における太陽光温度は、真夏で40°Cから50°C程度まで上昇すると想定されるが、そのような環境下においても発汗計測用の温度センサへの影響がほとんどない程度（+2~3°C）に抑えることを一旦の目標とした。

### 6.2.1 輻射熱確認実験方法

熱輻射の影響を確認するために、ヘルメットから50 cm離れた位置から500Wのハロゲンランプを30分間照射し、各箇所の温度を計測し影響を評価する。この方法は、ヘルメットメーカーが熱輻射試験で実施する方法[93]である。温後計測位置は、ヘルメット表面（外側）、ヘルメット中心（内側）、INセンサ装着部位（内側）、OUTセンサ装着位置（内側）の4か所の温度を毎分計測して、熱輻射の影響を確認した。



ヘルメット          ハロゲンランプ (500W)

Fig.6.2.1 熱輻射試験実験状況と温度計測位置

### 6.2.2 輻射熱確認実験および考察

このハロゲンランプによる試験では、10分経過するとヘルメット正面温度はちょうど炎天下同様の40°C~50°Cになる。

何も対策をしない場合(Table .6.2.1\_1 ①)、INセンサはランプの影響を受け、35.4°Cまで上昇し、影響を受けないOUTセンサとの温度差は9.0°Cの差がついてしまい、これでは正しく発汗量を求めることができない。そこでいくつかの対策を講じた。まずINセンサ前面に4mmのアルミ板を配置し熱反射を試みた(Table .6.2.1\_1 ②)が、回り込み影響が大きいためかOUTセンサとの温度差は10°Cとほとんど改善は見られなかった。

次にヘルメット全体を遮熱すべく、ヘルメット内面を覆うように遮蔽シート (ヘルピタ) を張った(Fig.6.2.1\_1 ③)所、若干の効果がみられOUTセンサとの差は8.0°Cとなった。さらにヘルメット正面にも遮熱シールドを張り(Table .6.2.1\_1 ④)計測した結果、大きな改善がみられ、OUTセンサとの差は2.3°Cとなった。さらにヘルメット正面に遮熱シールド、外面に遮熱材 (シャネボウ) を追加(Table .6.2.1\_1 ⑤)することで太陽光の影響を大きく除去でき、OUTセンサとの差を1.6°Cまでに抑えることができた。しかしヘルメットの正面や内側に、これだけの遮蔽材を張り付けるとかなりの重量増となり実用は考えられず、もっと簡易な方法で温度上昇を止める必要があることがわかった。

Table 6.2.1\_1 熱輻射実験結果


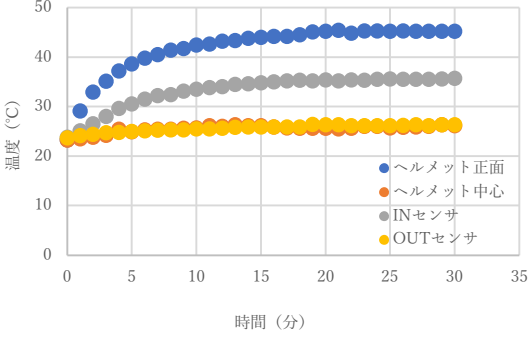

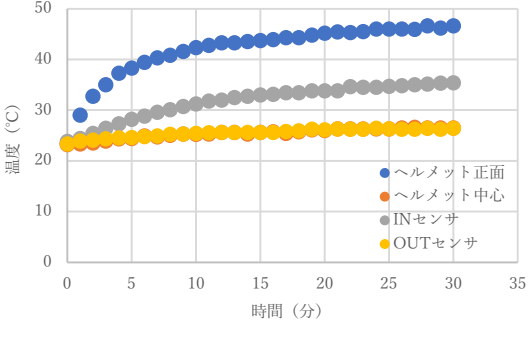

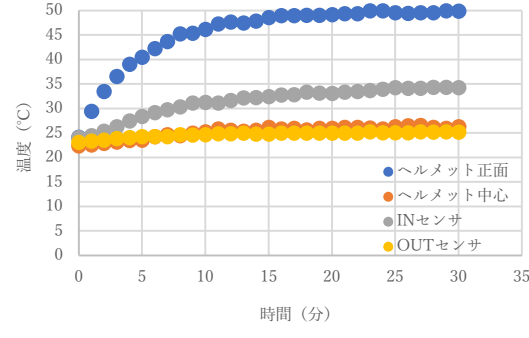

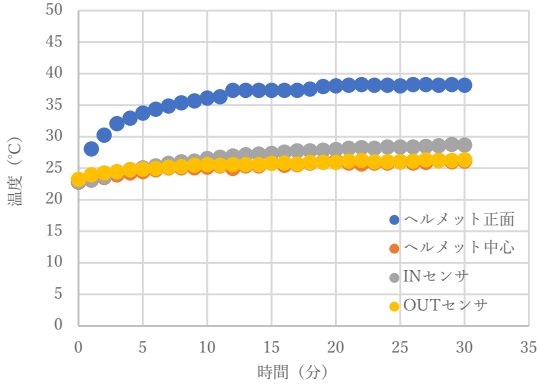

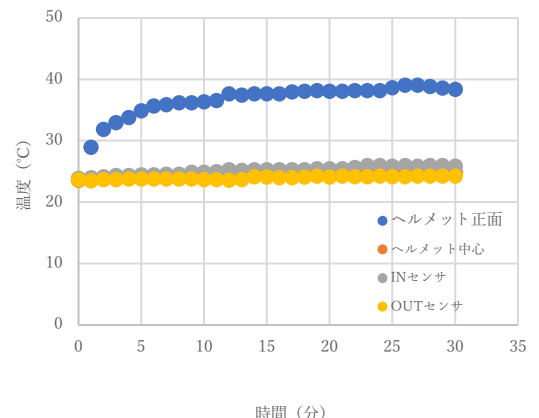
ヘルメット状態	熱輻射時の温度計測結果	コメント
<p>① ヘルメットのみ</p> 		<p>ヘルメット正面 45.2°C</p> <p>INセンサ 35.7°C</p> <p>↑</p> <p>OUTセンサ +10.0°C</p>
<p>② INセンサ位置に4mmのアルミ</p> 		<p>ヘルメット正面 46.6°C</p> <p>INセンサ 35.4°C</p> <p>↑</p> <p>OUTセンサ +9.0°C</p>
<p>③ ②+ヘルメット内側に遮熱シール (ヘルピタ)</p> 		<p>ヘルメット正面 49.9°C</p> <p>INセンサ 34.3°C</p> <p>↑</p> <p>OUTセンサ +8.0°C</p>



Table 6.2.1\_2 熱輻射実験結果

ヘルメット状態	熱輻射時の温度計測結果	コメント
<p>④ ③+ヘルメット外側にも遮蔽シールド</p> 		<p>ヘルメット正面 38.2°C</p> <p>INセンサー 28.7°C</p> <p>↑</p> <p>OUTセンサー +2.3°C</p>
<p>⑤④+遮蔽シールド（正面）遮熱材（内側）を追加</p> 		<p>ヘルメット正面 38.4°C</p> <p>INセンサー 25.9°C</p> <p>↑</p> <p>OUTセンサー +1.6°C</p>

そこで、遮蔽シールド（アルミ）と断熱材（繊維もしくは発泡スチロール系）の組み合わせを検討した。

まず、遮蔽シールド（アルミ）で熱を遮蔽する。遮蔽シールドが金属だとシールドそのものが熱を持ってしまうので、遮蔽シールドの上に繊維系か発砲スチロールの断熱材を置き、熱を断熱しその上にセンサを配置することで、全面金属の遮蔽シールドを厚く配置しなくても熱を遮断できるのではないかと考え、追加実験を行った。実験結果のまとめをTable 6.2.2に示し、熱輻射実験で使用した機器や遮熱シートをTable 6.2.3に示す。

断熱材入りアルミ遮蔽シート(Table .6.2.1\_3 ⑥)や発泡スチロール(Table .6.2.1\_3 ⑦)だけだと遮熱効果は満足できないが、遮熱シールド（アルミ）に断熱材や発砲スチロールを重ねる(Table .6.2.1\_3 ⑧)と、遮熱の影響を受けるINセンサへの温度影響が2.3°Cに収まり目標の2~3°Cに入り、この対策により、太陽光による熱影響を受けずに発汗計測できると考えられる。

Table 6.2.1\_3 熱輻射実験結果


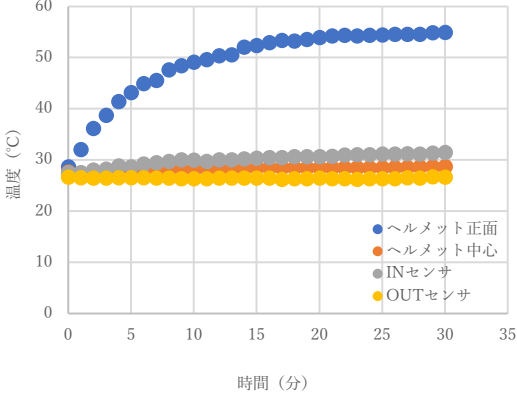
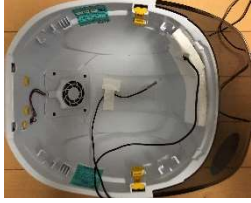
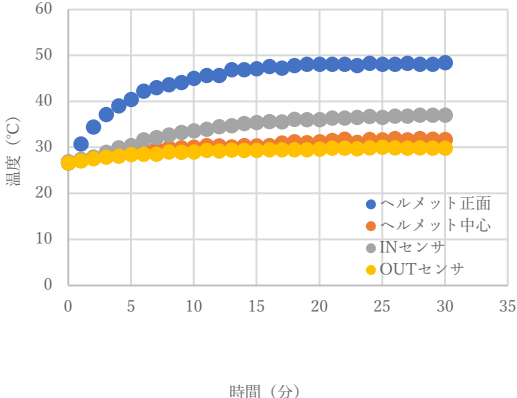
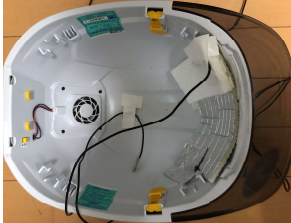
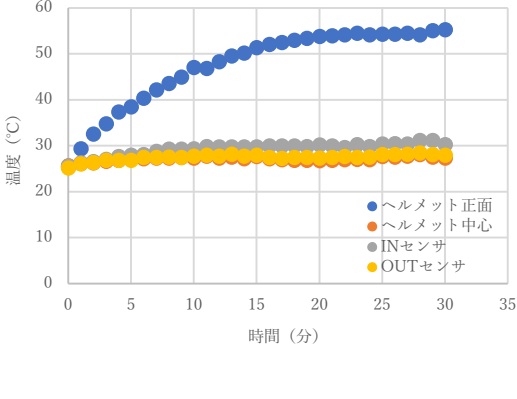
ヘルメット状態	熱輻射時の温度計測結果	コメント
<p>⑥</p> <p>外側：何もせず 内側：断熱材入り遮熱シート(10mm)</p> 		<p>ヘルメット正面 54.9°C</p> <p>INセンサ 31.4°C</p> <p>↑</p> <p>OUTセンサ +4.8°C</p>
<p>⑦</p> <p>外側：何もせず 内側：発砲スチロール(10mm)</p> 		<p>ヘルメット正面 48.4°C</p> <p>INセンサ 37.0°C</p> <p>↑</p> <p>OUTセンサ +7.2°C</p>
<p>⑧</p> <p>外側：何もせず 内側：遮熱シート、断熱材入り遮熱シート(4mm)、発砲スチロール(10mm)</p> 		<p>ヘルメット正面 55.3°C</p> <p>INセンサ 30.3°C</p> <p>↑</p> <p>OUTセンサ +2.3°C</p>

Table 6.2.2 熱輻射実験結果まとめ

	ヘルメットへの追加遮熱構造		ヘルメット内外4か所の計測温度 (°C)				2点の温度差 (°C)	
	外側	内側	外側 正面	内側 中心	内側IN センサ位置	内側OUT センサ位置	中心とIN センサ	INセンサと OUTセンサ
①			45.2	26.1	35.7	26.3	9.6	9.4
②	アルミ板4mm		46.6	26.5	35.4	26.4	8.9	9.0
③	↑	ヘルピタ	49.9	26.3	34.3	25.2	8.0	9.1
④	+遮熱シールド	ヘルピタ	38.2	26.2	25.7	26.4	2.5	2.3
⑤	↑+追加遮熱シールド	ヘルピタ シャネボウ	38.4	24.9	25.9	24.3	1.0	1.6
⑥	-	断熱材入り アルミ遮熱シート	54.9	28.7	31.4	26.6	2.7	4.8
⑦	-	発砲スチロール	48.4	31.7	37.0	29.8	5.3	7.2
⑧	-	遮蔽シールド 断熱材入りアル ミ遮熱シート+ 発砲スチロール	55.3	27.4	30.3	28.0	2.9	2.3

Table 6.2.3 熱輻射実験 使用機器及び使用遮熱シート

使用機器及び 材料名称	メーカー	型式・番号
ヘルメット	(株) トーヨーセ フティー	送風機内蔵ヘルメット No.395F
ハロゲンランプ	キャスターライテ イングジャパン	スパーハロゲンライト 500W
アルミ板	ユニホビー	アルミ1mm HA1013
遮熱シールド	DRC (ダートフリーク)	ヒートシールド D31-03-112
ヘルピタ	(株)谷沢製作所	ヘルメット用遮熱シール ST#1906
シャネボウ	日本遮熱株式会社	ヘルメット用遮熱材 メットクーリング
断熱材入りアルミ 遮蔽シート	楽天 e-adhoc	【1m×1m】業務用 アルミ遮熱シート /断 熱・防寒/保冷・保温/節電・建材・車内等エ コ対策に/
発砲スチロール	—	汎用品 10mm

## 6.3 深部体温に関する検討

### 6.3.1 発汗量と深部体温の同時計測実験

より高精度な熱中症早期罹患指標を検討するうえで、体温は熱中症発症の根源の原因となる非常に重要なバイタル情報である。特に核となる深部体温は、第2章の熱中症の機序で説明したように、熱中症にとって生死に係る重要なバイタル情報であり、発汗量と同時に深部体温を計測することでより熱中症罹患状態を把握するのに役立つと考えられるので、発汗量計測と同時に深部体温も測定することとした。

通常深部体温の計測は、直腸による計測が最も精度が良いとされている。しかし行動中に直腸にプローブを入れて計測するのは非現実的であり、今回は皮膚表面から深部体温を推測できる熱流束法によるセンサを使用して、深部体温を計測した。熱流束法による深部体温計測方式にもTable 6.3.1に示される3通りが知られているが、今回は現状手軽に入手可能なSingle Heat Flux法によるセンサ（アフォードセンス社製 VitalgramCT）を使用した[57]。

Table 6.3.1 熱流束法による深部体温計測方式[57]

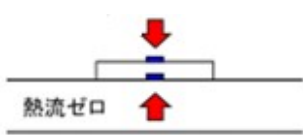

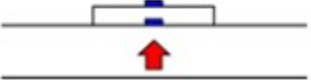
方式	Zero Heat Flux	Dual Heat Flux	Single Heat Flux
原理	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ヒータによる兼ねる</li> <li>・熱量をゼロに保証</li> <li>・わきの下と同じ状況が</li> </ul>  <p>作れる</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・2つの熱流を作る</li> <li>・4つの温度計で2つの熱流束計測</li> <li>・三角測量的深部体温計測</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>・1つの熱流</li> <li>・2つの温度計で熱流計測</li> <li>・相対変化のみ計測</li> </ul> 
特徴	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ヒータによる強制加熱により、比較的早い立ち上がり</li> <li>・環境温 &gt; 体温の場合は測定不可</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ヒータ不要</li> <li>・絶対値計測できる</li> <li>・環境温 &gt; 体温でも計測可</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ヒータが不要</li> <li>・構造が容易で信号処理部と一体形成可能</li> <li>・環境温 &gt; 体温の場合も測定可</li> </ul>
性能	<ul style="list-style-type: none"> <li>・前額、手足なら測定可</li> <li>・腹部では誤差を生じ、皮下厚大、体温-環境温度差が大きいと誤差大</li> <li>・製品として、3Mベアハガー</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・比較的誤差は少ないが、皮下厚大では難しい、時定数も大きくなる</li> <li>・絶対値計測のアルゴリズムが複雑</li> <li>・AffordSENSで開発中</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・絶対温度での測定ができないので最初に脇下体温等で校正する</li> <li>・シンプルなアルゴリズム</li> <li>・誤差性能は同左</li> <li>・Vitalgramha本方式</li> </ul>



Fig.6.3.1 アフォードセンス社製 VitalgramCTセンサの外観

本実験で使用したセンサは、推奨装着部である肋骨下の左脇腹に装着し、皮下脂肪の校正を行って計測した。第5章で述べた、行動下ヒト検証実験時の8名について、発汗量と同時に深部体温を計測した。その時に計測された、深部体温と積算体重減少量(全身発汗相当量)の関係を Fig.6.3.2に示す。

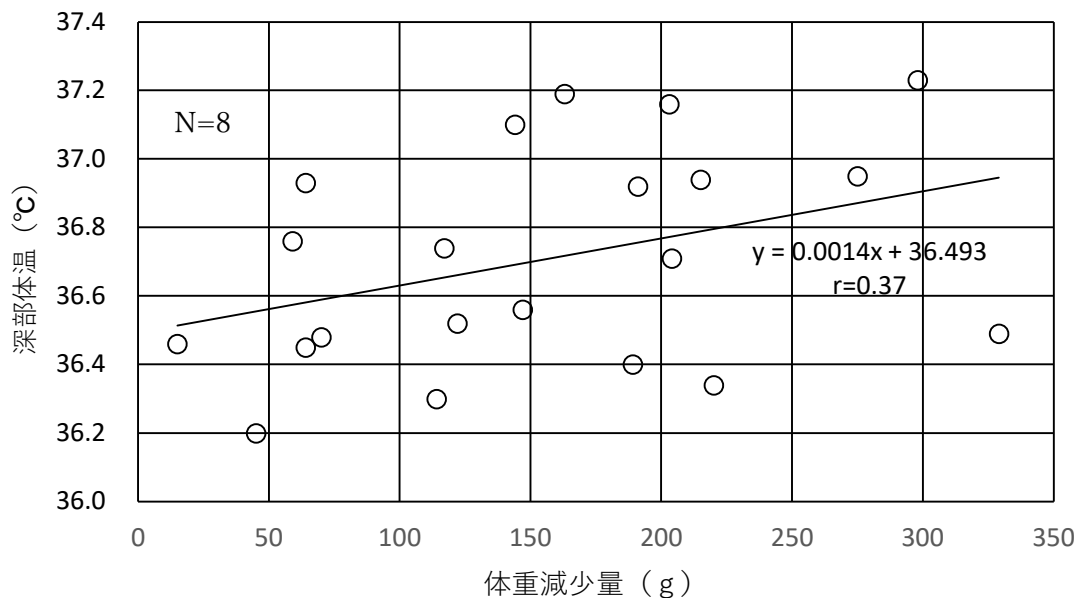


Fig.6.3.2 深部体温と体重減少量（全身発汗相当量）の関係

今回の計測結果では全身発汗量と深部体温において、正の相関を認められたが、相関係数 $r$ は、 $r=0.37$ と小さく、非常に弱い相関であった。また行動経過時間と計測された積算体重減少量(発汗量相当)及び深部体温の経時変化をFig.6.3.3に示す。

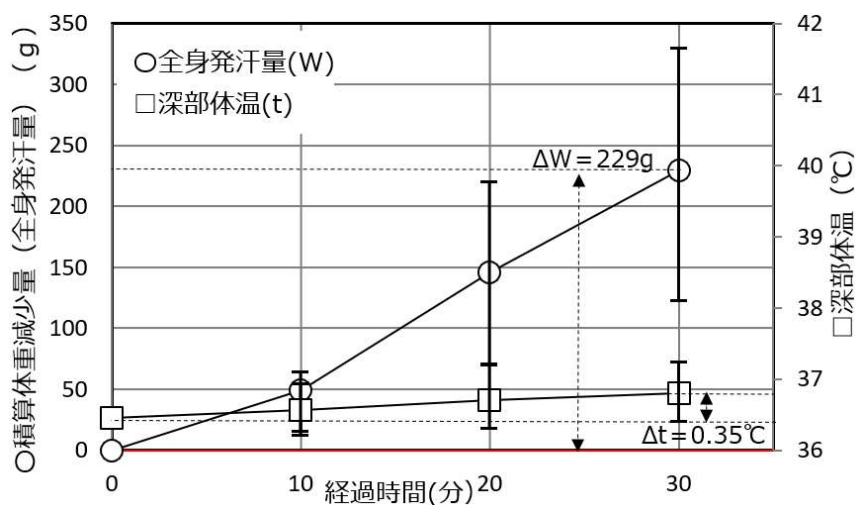


Fig.6.3.3 積算体重減少量及び深部体温の経時変化

本実験における30分の計測では、深部体温上昇と比較して、発汗量の上昇が顕著であった。先行研究[54]によると、運動開始時きわめて短い潜時で発汗活動は増加し、深部体温の上昇は遅れるか一過性に下降すると述べられており、先行研究[54]内容とも一致する結果が得られた。また高温熱ストレス下では深部体温の著しい上昇が報告[55]されているが、皮膚温度や深部体温計測方法よりも、熱中症の早期罹患予測指標には、早期に値の上昇が判別しやすい発汗量の増加を計測することが、より有効であると考えられる[46]。

### 6.3.2 深部体温と発汗量に関する既存研究

前節の実験から、熱中症の早期罹患指標としては、累積発汗量を使用できる可能性があると帰結したが、第2章の熱中症の機序で説明したように、深部体温は熱中症発症の根源の原因となる非常に重要なバイタル情報であることにはかわりはない。このため、深部体温と発汗量の相関や特徴について、既存研究の整理を行った。

発汗量や皮膚血流量などの身体の列放散機構には、深部体温と皮膚血流量が大きな入力となる。深部体温と発汗量や皮膚血流量は正の相関関係となり、またこの関係は皮膚温が上昇すると左へ移動する(Fig.6.3.4)。また近年、欧米では鼓膜温が深部体温の指標として用いられている。鼓膜温は生命維持に直結している脳温を反映していると考えられている。



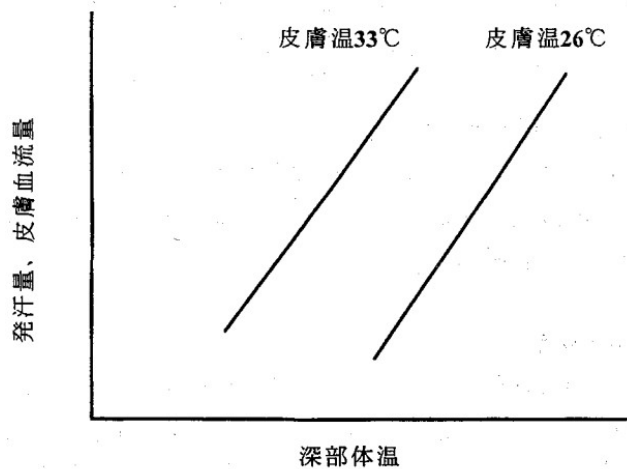


Fig.6.3.4 深部体温と熱放散量の関係[60]

運動開始時は、運動に必要な筋肉へ優先的に血液を送らなければならないので、内臓や皮膚の血流量は運動開始時に低下する。しばらく運動を継続すると、深部体温が上昇し始め、皮膚血流量は増加する。発汗も深部体温の情報に伴い、体表面全身でみられるが、高温環境下ですでに発汗がみられる場合には、運動を開始すると深部体温や皮膚温が変化していないにもかかわらず、数秒の潜時をもって発汗量が急増する[60]。つまり体温調節機構に重要な入力がなくとも発汗が起こり、この現象は非温熱性要因と呼ばれている。

運動中は、深部体温が上昇すると発汗量や皮膚血流量は増し、その量は同じ運動でも環境温度が上昇すると増加する[60]。

運動トレーニングと体温調節機能の関係に関しては、トレーニングや順化後には同じ深部体温でも発汗量や皮膚温度が多くなり、トレーニングによって熱放散機能が改善されることを示している。しかし水泳選手においては、発汗能力が劣っており、何が影響しているのかはまだ不明である[60]。

一般に高齢者は、発汗量や皮膚血流量の低下により、深部体温の維持能力が若年に比較して劣ることが報告されている[60]。また男性と女性を比較すると、女性の方が発汗能力が劣るという報告がされている(Fig.6.3.5)。

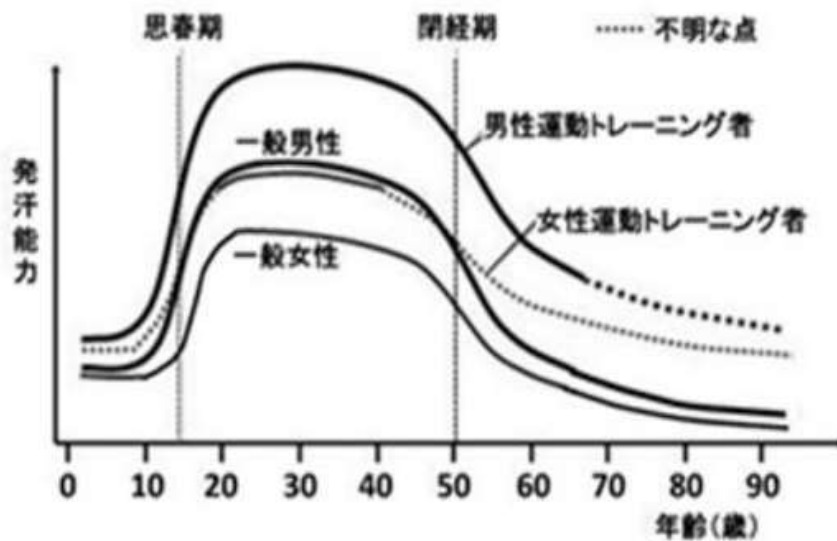


Fig.6.3.5 発汗能力の発育・老化家庭とその性差の模式図[61]

ただし、深部体温上昇に対する発汗量に差が出るのは、加齢ではなく、 $VO_{2max}$ が影響しているからであるとも論じられている[62]。

Fig.6.1.3に、若年成人( $VO_{2max}=47\text{ml/kg/min}$ )、高体力高齢者( $48\text{ml/kg/min}$ )、一般高齢者( $30\text{ml/kg/min}$ )を対象に、相対的運動強度を同等にした被験者実験の結果を示す。それぞれの直腸温変化には違いが見られなかった(Fig.6.3.6\_A)。総発汗量は、若年成人と高体力高齢者で同等であり、一般高齢者では少なかった(fig.6.3.6\_B)。このことから、深部体温は相対的運動強度に、発汗量は絶対的運動強度に関係性があると言える。

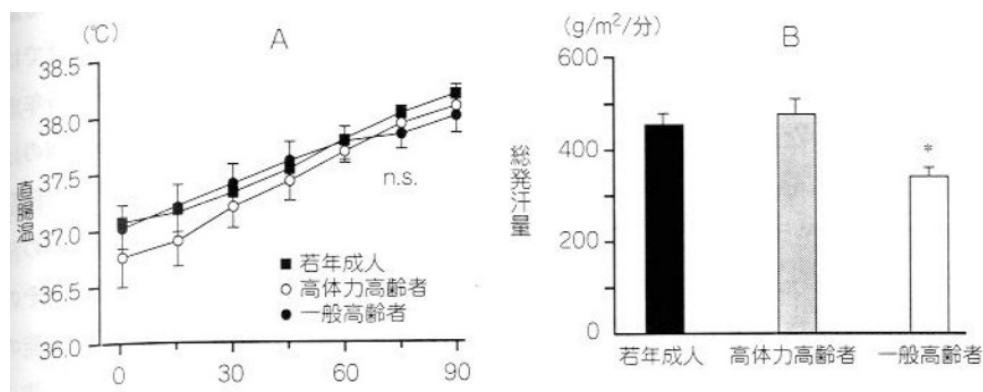


Fig.6.3.6 若年成人,高体力高齢者,一般高齢者における運動時の直腸温 (A) と総発汗量 (B)

また深部体温は最も代表的に日内変動を示す生体パラメータであり、その値は朝方に最も低く、夕方に最も高い日内変動を示す。

以上述べてきたように、深部体温と発汗量は総じて相関があるが、年齢や性別によって傾向が違う場合があり、熱中症発生の機序から考えても深部体温は、熱中症の罹患指標候補のひとつであると考えられ、発汗量と共に深部体温も併用して計測することで、2つの情報から予測することになり、より正確に熱中症罹患を予測できる可能性がある、と考えられる。

深部体温計測の課題は、ウェアラブル行動下でいかに精度良く計測するかであると考えられる。直腸で行動時に常時計測するのは不可能であり、鼓膜温計測も精度と安全性に課題があるが、外耳道空間の体温を計測することで深部体温が測定できる[69]との研究も発表されているが、まだ一般用途向けに安定的に行動下で常時深部体温計測できるデバイスは存在しない。より精度よく熱中症を予測するのに、深部体温は有益であると考えるので、引き続き研究を行っていく必要があると考えられる。

## 6.4 心拍変動 (HRV) に関する検討

### 6.4.1 HRVとは

心臓は洞結節や房室結節が持つ自動能によって律動的収縮を繰り返しているが、その一方で自律神経による各種作用を受けている。この心臓への交感神経と副交感神経の作用を分離・抽出することによって、両神経の心臓への作用の範囲とその程度を把握する試みが行われてきた。心拍変動 (HR variability) を周波数帯別に定量化することでこの分析が可能であると多くの研究者に報告されている[63]。今日分析に多く用いられている周波数頻度帯とその作用の内容をTable 6.4.1に示す。

Table 6.4.1 心拍変動のパワー名、頻度帯及び作用内容

パワー	頻度帯 (HZ)	作用の内容
HF	0.15~0.40	呼吸系の影響 (副交感神経の活性水準指標)
LF	0.04~0.15	血圧系の影響 (交感・副交感神経の活性水準指標)
VLF	0.0033~0.040	末梢血管運動やレニン・アンジオテンシン系の指標
ULF	<0.0033	サーカディアンリズム、神経内分泌や不明のリズムの影響
TP	0.01~0.40	24時間の変動を示す
SD		RR間隔の標準偏差
LF/HF		交感神経と副交感神経のバランスを示す y (主に交感神経の活性指標)

心拍変動の一般的な計測方法を述べる[63]。Fig.6.4.1の図Aに示されるように、心電計等で心電波形を計測し、R波とR波の時間間隔を連続して計測する。測定されたRR間隔を1/1,000秒の単位で示すと図Bのようなになる。この図の鋸状のぎざぎざは主に副交感神経の働きを示すが、これを定量的にするため、周波数解析を行うと図Cが、さらにそれをヒストグラムであらわすと図Dが得られる。解析用ソフトも多く市販されており、容易に解析可能であるが、人のHRは微妙な心理状態や呼吸変動、あるいは環境・測定条件によって変動するので、測定条件を十分考慮して測定しなければならない[59]。

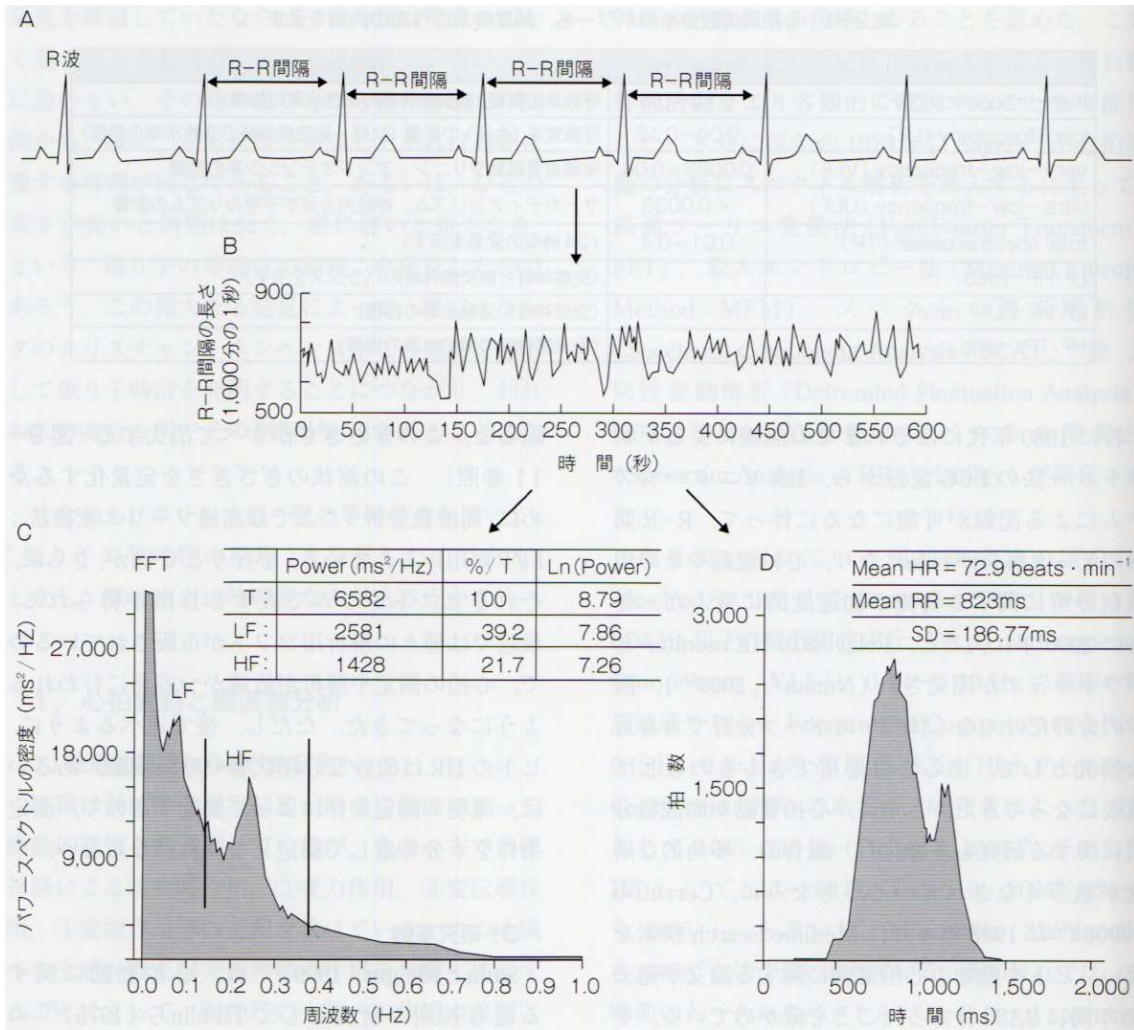


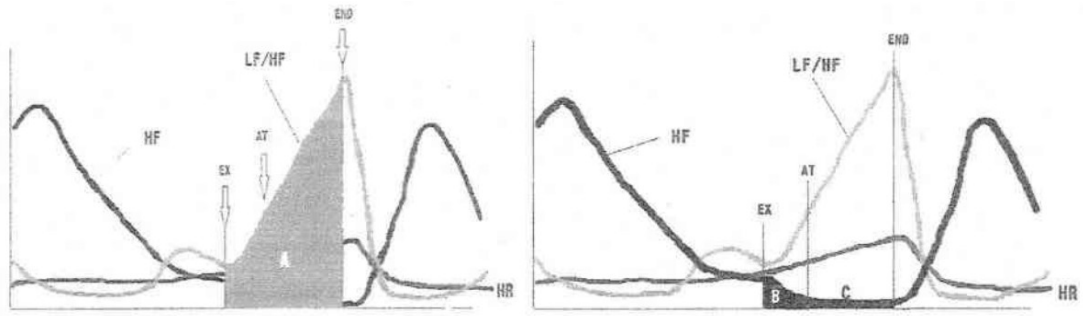
Fig.6.4.1 心拍変動と解析手順[ 63]

#### 6.4.2 HRVと熱中症の関係

熱中症及び暑熱下での運動とHRVの関係については、いくつか研究されており、以下のよ  
うな報告がされている。

Table 6.4.2 暑熱下での動作とHRVの関係 (まとめ)

研究グループ	環境	動作	交感神経 (LF/HF)	副交感神経 (HF)	心拍数
日新鉄鋼 [64] 山口大学	暑熱曝露試験 (WBGT30°C) (高温、30分)	座位安静	増加↑	減少↓	+4.5
Sollers[65]	暑熱曝露試験 (35°C,60%)	座位安静	↑	↓	+8
Benner[66]	暑熱曝露試験 (WBGT30°C)	座位安静	↑	↓	+6.7
天田他[67]	心肺負荷試験 (室内)	心肺負荷試験 エルゴメータ	↑	↓	+30
岡他[21]	消防訓練 (室内 25°C) (50~60%)	消防活動モデル	$\beta$ 小 (↑)	0.1~1Hz 平坦(↓)	+4.5
早野他[68]	ゴルフ (最高33.1°C) (PM2:40)	ゴルフラウンド ※熱中症発生	減少↓	増加↑ (バースト)	-40



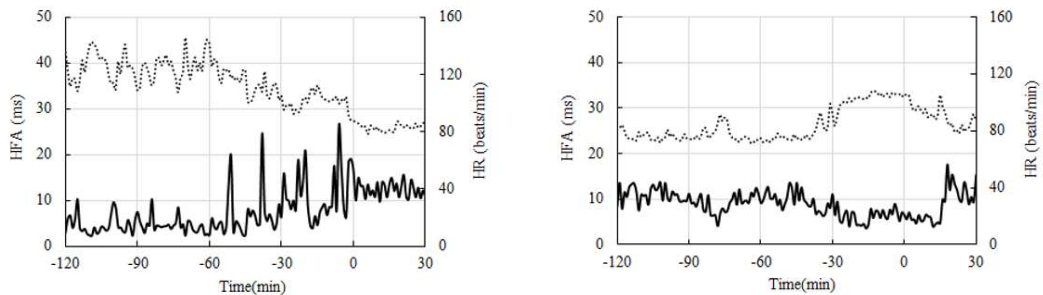
自律神経活動の評価指標

A : LF/HF の負荷開始から終了までの総和

B : HF の負荷開始から無酸素代謝閾値までの総和

C : HF の無酸素代謝閾値から負荷終了までの総和

Fig.6.4.2 運動負荷試験における自律神経活動の経時変化[67]



ゴルフ中の失神前後の HR と HF 振幅

- ・ HR 低下 & HF 振幅上昇
- ・ スパイク様 HF バーストあり

通常ウォーキング前後の HR と HF 振幅

- ・ HR 上昇・HF 振幅減少
- ・ スパイク様 HF バースト無し

Fig.6.4.3 熱中症の前兆現象とHRV[68]

暑熱曝露試験、心肺負荷試験、消防訓練のいずれにおいても、試験経過と共に心拍 (HR) は増加し、交感神経 (LF/HF) も増加、副交感神経 (HF) は減少する。しかし早野ら[68]によると、ゴルフ中の熱中症発生の場合、心拍数が急激に減少し、HFがバースト上に増加する現象が現れるという報告がある。この現象は、熱中症に伴う脱水や末梢血管の過拡張に起因する心臓への静脈還流の減少によって心室の過収縮が起こり、心室の機械受容体刺激を介するBezold-Jarisch reflexによって、副交感神経が強く刺激されることによって起こると言われている[68]。この現象は、心拍だけ見ていると判別不能だが、HFを観察していると判別可能であるため、HRVを計測することによる熱中症予防の可能性が示唆されている[21]。

以上述べてきたように、HRVを計測することで、熱中症を把握することができるという研究事例がいくつも発表されている。また熱中症の機序から考え自律神経が感染を刺激し発汗を促すため、自律神経の変化がHRVとらえられるのであれば、HRVを活用し自律神経指標を計測し監視することで、熱中症の早期罹患指標として活用できる可能性はあると考えられる。後述するが、労働安全衛生管理の観点からSpO<sub>2</sub>[74]が計測できると望ましいとのニーズもあり、そのセンシング手法でHRVも計測可能であるため、今後より良いシステム構築のために検討する価値のあるパラメータであると考えられる。

ただし、6.4.1で述べたように、HRVは微妙な状態を計測することになるため、測定条件を十分考慮して計測しなければならない。

## 6.5 塩分と熱中症の関係

### 6.5.1 塩分計測の重要性

第2章の熱中症の機序でも述べたが、発汗により体から水分と塩分が放出される。大量の発汗のあとに、塩分の少ない水分を大量に摂取すると少し時間が経ってから血液中のナトリウム濃度が低下する（低ナトリウム血症）。この状態は筋肉の収縮を誘発するので、物を握っている手を自分では開くことが出来なくなったり、手足がつったり腹筋等がこむらえりすることがある。この状態を「熱けいれん（heat cramp）」と呼ぶ。このような時は、食塩入りの飲料や食品を摂取させたり、医療機関でナトリウム入りの点滴を受けさせたりすることが必要である。なお、大量の筋細胞が壊れると急性腎不全を生じる場合があるので、尿の色が濃いときや尿がほとんど出ないときは、医療機関を受診させ腎臓の尿の検査を受けさせる必要がある[6]。

ボストンマラソンにおいて、一部の参加者を対象にレース後に血液検査を実施したところ、13%に低ナトリウム血症をきたしていた[70]。レース前後での体重増加、フィニッシュタイムが4時間以上であることが、低ナトリウム血症の発生と関連していた熱中症予防のために水分摂取は不可欠であるが、水中毒にならないように、適切な水分量、電解質を摂取しなくてはならない。運動時の水分摂取量の目安について、米国スポーツ医学会の見解[71]を参考に以下に示す。

- ・運動開始の数時間前に体重1kgあたり5~10mlの水分を摂取する。
- ・運動による水分喪失が体重の2%未満になるように、運動中も0.4~0.8l/時間を目安にこまめに水分補給を行う。脱水予防のためには口渇感がなくとも水分補給をすることが重要であ



る。マラソンのような長時間の持久系運動の場合は、電解質及び糖質の補充も重要であるため、スポーツドリンクの摂取も望ましい。理論的には、1時間あたりスポーツドリンク(500ml)を1~2本程度摂取することで、適切な水分・電解質・糖質を補充できることになる。

・運動後も発汗や排尿により水分喪失は遷延するため、遅延性の熱中症を予防するには、運動による水分喪失量の125~150%程度を補うことを目安に、運動後も水分摂取を継続する。

日本救急医学会熱中症に関する委員会が行ったHeatstroke STUDY2006 から、血中Na の異常を示す例は525 例中6% に認められ、2% が高Na 血症(日常生活の高齢者)、4% が低Na 血症(中壮年の肉体労働者)であった[72]。

熱中症では水分とともにNa など電解質の喪失があるので、Na 欠乏性脱水が主な病態であり水分の補給に加えて適切な電解質の補給が重要である[72]。そのため、熱中症の徴候を認めた際には特に塩分と水分が適切に配合された経口補水液(ORS: Oral Rehydration Solution)が適切である。ORS は、当初発展途上国での乳幼児の脱水症の予防や治療目的、特にコレラによる脱水治療のために世界保健機関が開発した[72]。下痢や嘔吐などの症状を認めていても水分や電解質の吸収力を高める特性がある。推奨されている飲水量は高齢者を含む学童から成人が500 ~1,000mL /日、幼児が300 ~ 600mL /日、乳児が体重1kg 当たり30 ~ 50mL /日を目安としている[72]。通常の水分・電解質補給であれば市販のスポーツドリンクで十分であるが、生来健康な成人でも下痢や嘔吐、発熱、発汗、経口摂取不足でいわゆる夏バテを感じた際に飲むことで熱中症の予防になる[72]。

また2015年に中央労働災害防止協会が発行している熱中症予防対策のためのリスクアセスメントマニュアル(製造業向け)[58]には、水分塩分の補給ポイントとして、以下の記述がされている。

・こまめに水分・ナトリウムを補給

(作業開始前、及び作業中20 分毎に0.1 ~ 0.2% の食塩水、スポーツドリンクなどを100 ~ 200mℓ程度(コップ1 ~ 2 杯)飲む)

・のどが渇く前に水分・ナトリウムを補給

・大量の発汗時は、経口補水液も利用

以上述べてきたように、熱中症予防には水分のみならず、塩分の補給が重要である。このため、発汗量計測のみならず、塩分も計測し、補給アドバイスをすることが重要である。

## 6.5.2 塩分計測と熱中症に関する考察

塩分を計測するために、現在用いられている塩分計測方法を調査した結果を、Table 6.5.1に示す。

モール法は試薬が必要であり、屈折法は光学系とガラス面が必須となるが、イオン電極法や電気伝導度法による塩分センサであれば、小型低電力で実現可能であり、ヘルメットに装着できる可能性はあると考えられる。

Table 6.5.1 塩分計測方法の分類[73]

方式	測定方法	特徴
モール法・ 硝酸銀滴定法	塩素の量を 測って食塩 濃度を求め る 	色の変化で終点を見極めて 判断するため、経験が必要 とされ、測定誤差の可能性 がある。試薬が必要
イオン電極法	ナトリウムイオン濃度 に応じて発生する電位 から濃度を求める 	少量でも計測可能 小型化可能 試薬を必要としない
電気伝導度法	食塩(NaCl)がほかの物質に比べ て電気が多く流れることを利用し て、導電率を 測って食塩濃 度を求める 	持ち運び可能 測定時間が短い 試薬を必要としない 自動測定可能
屈折計方式	水溶液に固形物質が溶けていると 溶解量に応じて屈折率が高くなる ことを利用して、屈折率を測って 食塩濃度を求める 	光学系が必 要で多少の サイズとガ ラス面が必 要 Autoulet

以上述べてきたように、水分はもちろんのこと、塩分の補給は熱中症対策として非常に重要であり、塩分センサもヘルメットに装着できる可能性は十分にあると考えられる。このため発汗量に加え、塩分喪失量を同時に把握し、補給すべき水分と塩分を作業者に提示することが望ましいと考えられる。しかしながら、現在行動下で発汗の塩分量を計測できるシステムは存在せず、このようなシステムが提供できれば、本研究と合わせ、熱中症の早期罹患防止アラートを出せるシステムとして非常に有効であると考えられる。

## 6.6 統合型ウェアラブル熱中症予防デバイスシステムの提案

ここで、今までの研究成果を踏まえ、以下の統合型ウェアラブル熱中症予防デバイスシステムを提案する。統合型ウェアラブル熱中症予防ヘルメットデバイスを Fig.6.6.1 に、統合型ウェアラブル熱中症予防システムを Fig.6.6.2 に示す。ヘルメットに装着されているセンサにより、発汗量、深部体温、HRV、塩分が計測され、無線機能によってクラウドにデータが蓄積される。そして熱中症リスクが高まる（全身発汗量が体重の 1.5%に到達）と、補水アラートが発生し、作業者本人はもちろん、管理者も確認でき、水分補給をフォローすることができる。また、事前にシステムに入力されている個人情報（身長・体重、既用歴等）より、個人の健康状態に即したアドバイスを、健康管理室から産業医が行うこともできる。

深部体温、塩分センサはまだ開発中であり、アラートの閾値が明確化できていないが、今後開発完了次第実装し、より精度の高い熱中症予防デバイスシステムの構築を目指す。



Fig.6.6.1 熱中症予防ヘルメットデバイス

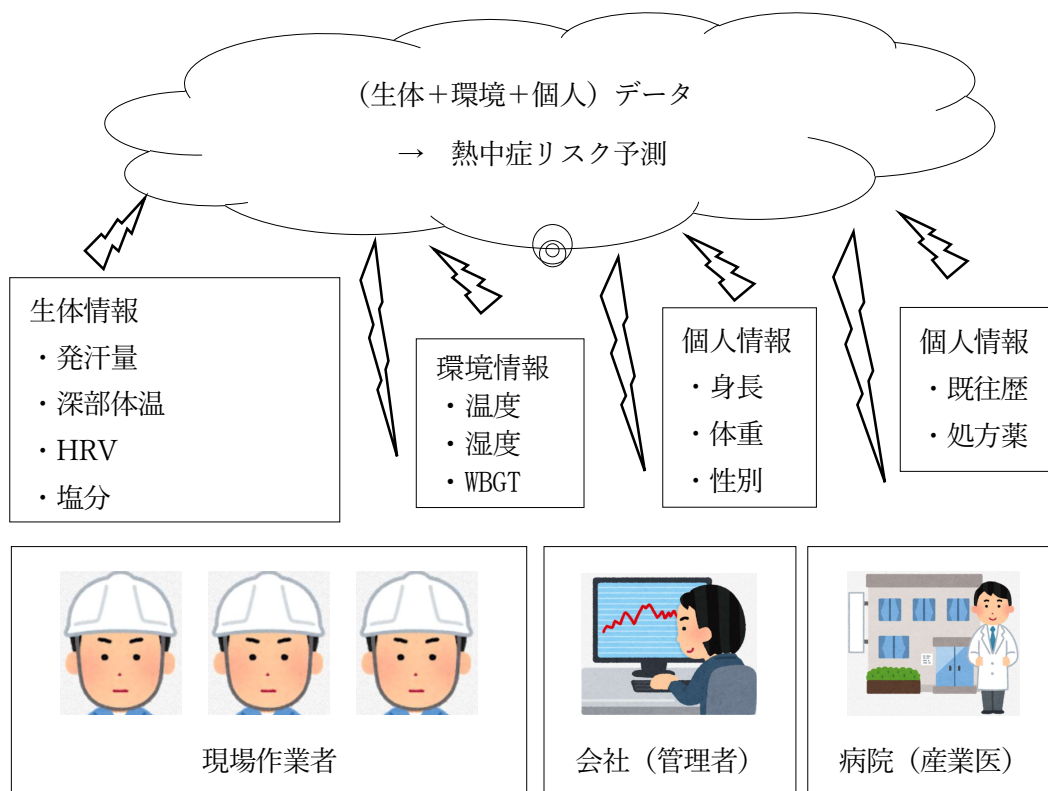


Fig.6.6.2 統合型ウェアラブル熱中症予防デバイスシステム

## 6.7 まとめ

まず、開発したヘルメット型発汗量計測デバイスをより完成度の高いシステムとするため、実用上課題になると思われる、炎天下における熱輻射のセンサに与える影響について、影響と対策を検討し、遮熱シールドと断熱材の組み合わせで解決できそうな目途が立った。

次に、新たなセンサを搭載して、より高精度な熱中症早期罹患指標を得ることができないか検討を行った。

深部体温については、運動開始初期において、全身発汗量と同時計測した結果、全身発汗量の上昇の方が深部体温の上昇より有意であり、熱中症の早期罹患検出と言った観点では、発汗量の方が適している可能性が高いと考えられる。

ただし、深部体温や HRV・塩分に関しても、ウェアラブルで計測可能な熱中症の生体指標として有益な点があることが解り、測定方法も調査した結果、ヘルメットに装着できる可能性が高い事がわかった。このため、発汗量計測結果とこれらの計測結果と併用することで、より高精度な熱中症早期罹患システムを提供することが可能になると考えられる。特に行動

下の塩分量が計測できるようになれば、水分と塩分の両面から補給アラートを発生させるシステムが可能となり、労働安全の側面から非常に有益であると考えられる。

以上の検討結果を踏まえ、理想的と考えられる、統合型ウェアラブル熱中症予防デバイスシステムの提案を行った。

## 参考文献

- [57]アフォードセンス株式会社,メドテックジャパン 2019 技術資料,2019/03/18
- [58]中労災,熱中症予防対策のためのリスクアセスメントマニュアル (製造業向け)  
[https://www.jisha.or.jp/research/report/201503\\_02.html](https://www.jisha.or.jp/research/report/201503_02.html) (アクセス2020年12月20日)
- [59]中川千鶴,自律神経系指標の計測と解析,人間工学,Vol.52,No.1('16),p6-12
- [60]近藤他,人の体温調節反応,神戸大学発達科学部研究紀要,5(2):55-66
- [61]井上他,老若男女の発汗能力の解明とその生態学的意義,科学研究費助成事業 研究成果報告書 機関番号:34429 研究期間:2011~2015 課題番号:23247046
- [62]井上他,体温II(第6章-I.発育と老化),P226
- [63]山路啓司,こころとからだを知る心拍数,P226~228
- [64]山本他,暑熱曝露の生体影響評価に関する検討 (その1),労働科学83巻,1号(1)~(6),2007
- [65]Sollers JJ 3<sup>rd</sup> et al.,Examining Changes in HRV in Response to Varying Ambient Temperature. IEEE Eng Med Bio Mag 2002;21:30-4
- [66]Brenner IK et al.,Spectral analysis of heart rate variability during heat exposure and repeated exercise .Eur J Appl Physiol Occup Physiol 1997;76:145-56
- [67]天田他,心肺運動負荷試験における自律神経の経時的変化の特徴,別府大学紀要 第55号 2014年:119-124
- [68]湯田他,心拍変動HF成分振幅のスパイク様バースト:熱中症の前兆現象,情報処理学会第80回大会:4-431
- [69]筒井他,耳栓で遮断された外耳道温の実験的検討,産業衛生学雑誌 46巻・増刊号,P306
- [70] Almond CS, et al: Hyponatremia among runners in the Boston Marathon. N Engl J Med 352 : 1550-1556,2005
- [71] Thomas DT et al : American College of Sports Medicine joint position statement. Nutrition and athletic performance. Med Sci Sports Exerc 48:543-568,2016
- [72] 日本救急医学会 熱中症診療ガイドライン2015 (アクセス 2020年12月19日)  
<https://www.mhlw.go.jp/file/06-Seisakujouhou-10800000-Iseikyoku/heatstroke2015.pdf>
- [73]ATAGO株式会社 塩分計の原理 (アクセス 2020年12月19日)  
[https://www.atago.net/japanese/new/databook-salt\\_principle.php](https://www.atago.net/japanese/new/databook-salt_principle.php)
- [74]日本呼吸器学会 よくわかるパルスオキシメータ (アクセス 2020年12月21日)  
[https://www.jrs.or.jp/uploads/uploads/files/guidelines/pulse-oximeter\\_general.pdf](https://www.jrs.or.jp/uploads/uploads/files/guidelines/pulse-oximeter_general.pdf)

## 第7章

統合型ウェアラブル熱中症予防

デバイスシステムの応用展開

## 7.1 はじめに

本論文では、建設現場での熱中症予防を想定し、ヘルメット型発汗量計測デバイスの開発と提案を行ってきたが、ヘルメット着用を義務化されている産業分野の仕事はまだあり、他の業種でも本提案は効果を期待できるのではないかと考えられる。このため、建設現場以外の産業分野で、どの程度応用できるか調査を行い、熱中症予防デバイスシステムの使用可能範囲（業種や人口規模）を明確にした。

さらに、その応用可能な産業において、労働衛生上熱中症以外にどのような課題が存在するのか調査を行い、ヘルメットに新センサを付加する事で、その課題も解決できないか検討を行い、開発したデバイスシステムの応用展開として適用分野の拡大について合わせて提案を行う。

## 7.2 建設現場以外での活用現場の検討

建設業以外にも、ヘルメットの装着を義務づけられている業務には、今回開発したヘルメットを積極的に活用し、熱中症予防に対応すべきである。具体的にどのような業種（現場）で有効に活用が可能か考察する為、ヘルメット着用義務が求められている業種の調査を行った。保護帽（ヘルメット等）の着用は労働安全衛生法により定められており（Table 7.1）、これらの用途で着用を怠ると罰則が事業者と労働者の双方に課せられる。

Table 7.1を参考に当研究で開発したヘルメットを展開できる、具体的な作業現場の拾い上げを行った結果をTable 7.2に示す。



Table 7.1 労働安全衛生法による保護帽（ヘルメット）着用規定[75]

労働安全衛生規則による保護帽の着帽規定		クレーン等安全規則による保護帽の着帽規定	
第151条の52	不整地における5トン以上の運搬車の荷の積み下ろし作業	第33条	クレーンの組立・解体作業
第151条の74	5トン以上の貨物自動車の荷の積み下ろし作業	第75条	移動式クレーンのジブ組立・解体作業
第194条の7	建設工事でジャッキ式つり上げ機械を用いて行う荷のつり上げ、つり下げ等の作業	第118条	デリックの組立・解体作業
第247条	型わく支保工の組立作業	第153条	屋外に設置するエレベーター昇降路塔またはガイドレール支持塔の組立・解体作業
第327条	腐食性液体を圧送する作業で、腐食性液体の飛散、漏えいまたは溢流による身体の危険があるとき	第191条	建設用リフトの組立・解体作業
第360条	地山の掘削作業	<b>厚生労働省 行政指導通達による保護帽の着帽規定</b>	
第366条	明り掘削作業	S.50.4.10 基発第218号	荷役、運搬機械の安全対策について コンベヤ、フォークリフト、ショベルローダ、移動式クレーン、ダンプトラック等の機械を使用する作業。
第375条	土止め支保工作業	S.60.2.19 基発第90号	「林業における刈払機使用に係る安全作業指針」の周知徹底について 刈払機の刈刃破損、反発、及び転倒による災害を防ぐ。
第383条の3	ずい道等の掘削作業	S.60.4.5 基発第185号の3	ストラドルキャリアーによる労働災害の防止について 夜間にストラドルキャリアーの稼働区域内で作業させる場合は、夜光塗料を塗布した保護帽を着用させる。
第383条の5	ずい道等の覆工作業	H.5.3.2 基発第123号	清掃事業における総合的労働災害防止対策の推進について ごみの積替え作業、焼却時の攪拌作業等。
第388条	ずい道等の建設作業	H.5.5.27 基発第337号の2	建設業における総合的労働災害防止対策の推進について 木造家屋建築工事等小規模建築工事における墜落、木造加工用機械、飛来・落下物による災害を防止するため。
第412条(第404条)	採石作業	H.8.11.11 基発第660号の2	木造家屋等低層住宅建築工事における労働災害防止対策の推進について 高所作業に従事する作業員に対しては墜落用保護帽を着用させること。
第435条(第429条)	はいの上における作業(床面から2m以上)	H.25.3.25 基発0325第1号	「陸上貨物運送事業における荷役作業の安全対策ガイドライン」の策定について 墜落・転落の危険のある作業においては、墜落時保護用の保護帽を着用すること。
第451条	船内荷役作業 ※保護具として着用を規定。	H.26.3.10 基安発0310第3号	足場の設置が困難な屋根上作業等における墜落防止のための作業標準マニュアルについて 高所作業では墜落時保護用の保護帽を使用するものとする。
第464条	港湾荷役作業		
第484条	造林等の作業		
第497条	木馬又は雪りによる運材の作業		
第516条	林業架線作業		
第517条の5	鉄骨の組立等作業		
第517条の10	鋼橋架線等作業		
第517条の13	木造建築物の組立等作業		
第517条の19	コンクリート造の工作物の解体または破壊作業		
第517条の24	コンクリート橋架設等の作業		
第518条	2m以上の高所作業		
第538条	物体の飛来のおそれのある作業		
第539条	船台の付近、高層建築物等で、その上方から物体が飛来または落下するおそれのある作業		
第566条	足場の組立等作業		
第341条(第340-351、352条)	高圧活線作業		
第342条	高圧活線近接作業		
第346条	低圧活線作業		
第347条	低圧活線近接作業		

Table 7.2 ヘルメット型発汗計測装置が効果を発揮できる作業現場及び強度と度数

作業現場	作業人数	出典	度数[95]	強度[95]
建設現場	326万人	[85]	0.80	0.28
鉄鋼業	22万人	[86]	0.27	0.34
自動車製造	88万人	[87]	1.20	0.10
重工業	33万人	[88]		
警備	57万人	[89]	-	-
消防	15万人	[90]	-	-
林業	4.5万人	[91]	-	-
合計	511万人		-	-

- ・ 度数、強度は労働災害の発生率で、概ねどの建設会社でも目標値が定められている。
- ・ 度数とは100万延べ労働時間当たりの労働災害による死傷者数  

$$\text{度数} = (\text{労働災害による一日以上休業の死傷者数} / \text{延労働時間数}) \times 1,000,000$$
- ・ 強度とは1,000延労働時間当たりの労働損失日数をもって災害の重さの程度を表す  

$$\text{強度} = (\text{労働損失日数} / \text{延労働時間数}) \times 1,000$$
- ・ 表中の度数・強度は2018年の統計値、鉄鋼業のみ2015年の統計値

Table 7.2から、建設現場の作業人数が最も多いことがわかり、また鉄鋼業はそれに続く作業人数であるが、強度が強いため、より輻射の影響が大きい職場環境と予想され、本研究で開発したヘルメット型発汗量計測デバイスが有効な現場であると考えられる。自動車製造・重工業作業も100万人程度おり、度数が建設業より高く、同様に効果が期待でき、警備・消防分野・林業においても同様で、本研究で開発したヘルメット型発汗量計測デバイスが熱中症の早期罹患防止に関しての効果を示すことができると考えられる。

以上の様に、当初の研究目的であった建設業にとどまらず、幅広い産業分野において、本研究で開発した発汗量計測ヘルメットによる熱中症早期罹患アラートシステムが有効に機能するものと考えられる。

### 7.3 発汗量計測以外の活用用途検討

ヘルメット着用現場での健康障害を調査していくと、同様のシステムで熱中症以外の健康障害も予防できそうなことが判明した。産業分野別に、存在する主な健康障害[81]について、拾い上げを行った結果をTable 7.3に示す。

Table 7.3 業種別の主な健康障害

分野	主な健康障害[81]
建設業	不良姿勢、同一姿勢による腰痛・筋骨格系疾患、熱中症 振動障害、騒音性難聴、石綿・有機溶剤系・酸欠・一酸化炭素中毒
鉄鋼業	暑熱暴露、騒音 一酸化炭素中毒、酸欠
造船	熱中症、騒音性難聴 不良姿勢による過度な筋骨格系負担
自動車製造業	騒音対策、粉塵、熱中症（水分、塩分補給） 不良姿勢による腰痛
重工業	はさまれ・まきこまれ、転倒、動作の反動 無理動作、墜落・転落
消防	煙・酸欠、熱中症 ライフジャケット、トランシーバーの計画的更新
警備	転倒,交通事故,転落,無理動作,挟まれ・巻入れ 暑熱暴露

Table 7.3から、どの業種も同じような健康障害が発生しており、Table 7.4に示す5項目が大半を占めることがわかった。そしてそれらの健康障害も、発汗センサで熱中症を早期予防するように、必要なセンサ（加速度、SpO<sub>2</sub>、GPS）や、第6章で述べた、より高精度な熱中症早期罹患指標で状態をセンシングし警告を発生させることで、健康障害をより確実に予防できる可能性があるものと考えられる。

さらにそれらのセンシング情報の警告条件を調査した結果をTable 7.5に示す。

Table 7.4 主な健康障害と必要となるセンシング情報

主な健康障害[81]	必要なセンシング情報
熱中症対応	発汗,深部体温,HRV,塩分,温湿度,HR
不良姿勢による腰痛・筋骨格系疾患対応	加速度
石綿・有機溶剤系・酸欠・一酸化炭素中毒対応	SpO <sub>2</sub>
振動障害対応	加速度
墜落・転落	GPS

Table 7.5 センシング情報と警告条件

障害	センシング情報	警告条件	根拠
熱中症	発汗 ※1	体重減少量の1.5%	[5]
酸欠	SpO <sub>2</sub> ※3	<90%	[78]
姿勢	加速度	前屈>60°	[79]
振動	日振動ばく露量 ※2	<5.0m/S <sup>2</sup>	[80]
墜落・転落	GPS		
寒冷	温度	<5°C	
過負荷	体重、加速度、HR	消費cal.>	
作業時間	加速度等	>8時間	

※1 発汗量Pの求め方(Table 5.2.2)

$$P=9.54 \times Q-0.2 \times Y+0.76 \times W+0.17 \times He+2.56 \times C+1.3.2 \times Ha-0.1 \times Mc+4.89 \times Mt+27.1 \times T+0.87 \times Hu-1900$$

全身発汗量推定値 (g) P、頭部発汗量 (g) Q、年齢 (歳) Y、体重 (kg) W、身長 (cm) He、頭囲 (cm) C、頭髪量 (g) Ha、運動習慣 (回/週) Mc、運動時間 (分) Mt、気温 (°C) T、相対湿度 (%) Hu

※2 日振動ばく露量A(8)の求め方

「周波数補正振動加速度実効値の3軸合成値」と1日当たりの振動ばく露時間から、次式により日振動ばく露量A(8)を求める。

$$\text{日振動ばく露量} : A(8) = a \times \sqrt{T/8} \quad [m/s^2]$$

a[m/s<sup>2</sup>]は周波数補正振動加速度実効値の3軸合成値、T〔時間〕は1日の振動ばく露時間

※3 SpO<sub>2</sub>の求め方[74]

- ・ SpO<sub>2</sub>とは、血中のヘモグロビンに酸素がどれくらいの割合で結合しているかを示す指標
- ・ 正常時は95~99%程度を示し、酸素が不足してくると95%を下回る
- ・ 665nmと900nmの光を生体に照射し、それぞれ戻ってくる光成分より計算で求める
- ・ 2つのLEDと1つのPDで、SpO<sub>2</sub>・脈拍・HRVの計測が可能である

$$SpO_2 = \frac{C[HbO_2]}{C[HbO_2] + C[Hb]} \times 100 \quad [\%]$$

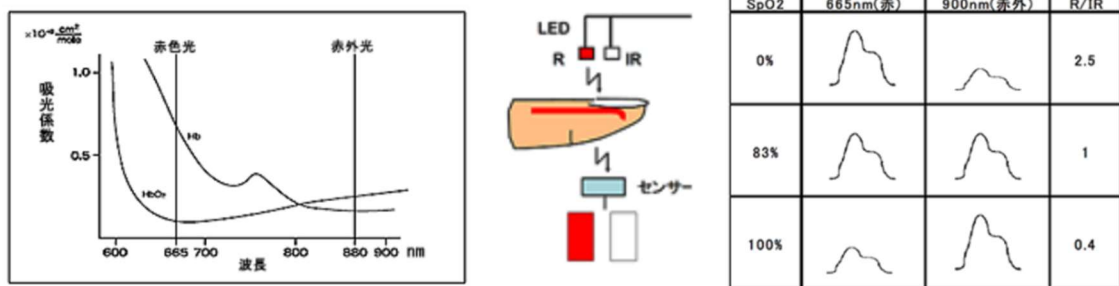


Fig.7.1 SpO<sub>2</sub>の原理式とセンサ波長[74]

#### 7.4 統合型ウェアラブル労働衛生管理デバイスシステムの提案

前章で提案したウェアラブル熱中症予防デバイスシステムを発展させた、統合型ウェアラブル労働衛生管理システムの提案を行う。

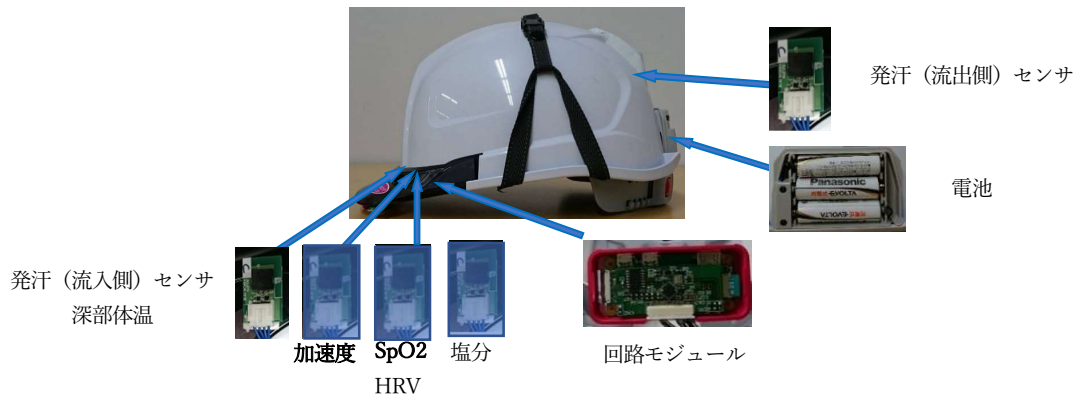


Fig.7.2 労働衛生管理用ヘルメットデバイス

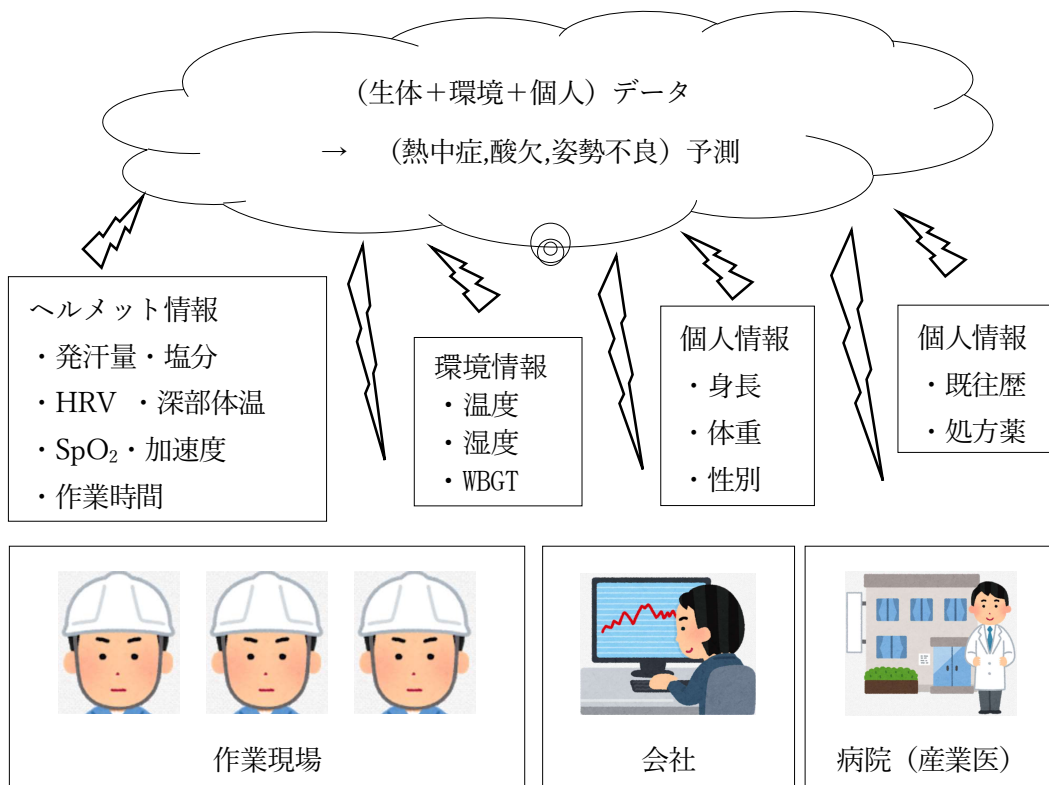


Fig.7.3 統合型ウェアラブル労働衛生管理システム

Fig.7.2に、本章で提案する労働衛生管理用ヘルメットデバイスの概要を示す。頭部発汗計測以外に、深部体温、HRV、塩分に加え、加速度、SpO<sub>2</sub>センサを搭載することことで、前節で考察した熱中症以外にも、さらにシステムとして酸欠、姿勢・振動異常、過重労働、寒冷障害等を予測し警告することが可能となる。

Fig.7.3に統合型ウェアラブル労働衛生管理システム全体のシステム概要を示す。現場で作業者が、発汗センサ（温湿度）、加速度、SpO<sub>2</sub>センサ等を装備したヘルメットを装着し作業することで、各種センシング情報がクラウドにアップロードされ、熱中症以外にも、酸欠、姿勢・振動異常等の労働上の各種リスクが把握でき、管理者はネットワークにつながったパソコン上で現場の労働環境全体（全メンバーの健康障害リスク度合い）を確認し、警告が上がったメンバーがいればフォローするなど現場と的確なやり取りができ、安全な作業現場の維持が可能になる。

デバイスの使用時間から作業時間が解り、労働時間の把握も可能である。また作業者がスマートフォンを携帯している場合は、GPS機能により、作業者の墜落・落下等の位置情報の収集も可能となる。

また本研究の中で検討した深部体温・HRV・塩分センサを加えることで、より高精度な熱中症の早期罹患予測はもちろん、万一発汗量が計測出来なかった場合でも、他センサで不足を補うことができ、よりフェイルセーフなシステムの構築が可能になると考えられる。

以上述べてきたように、ヘルメット型発汗発汗量計測デバイスをベースに、深部体温・HRV・塩分と加速度・SpO<sub>2</sub>センサを付加することで、労働衛生管理システムとして、各種の過酷な労働環境において、熱中症予防のみならず、他の健康障害リスクの低減にも貢献できるシステムが構築できると考えられる。

## 7.5 学校・スポーツ分野への応用

次に、産業分野以外にも、熱中症対策の必要な現場は多く存在し、学校における熱中症対策も重要性が高いと考え、学校における熱中症発生状況を調査した。



Fig.7.4 学年・性別 熱中症死亡者数（昭和50年~平成29年）[76]

高校1、2年生（男性）の熱中症発生が圧倒的に多い。夏にまだ体力のついていない高校1,2年生が、無理をして先輩についていこうとして発症してしまっていることが予想される。



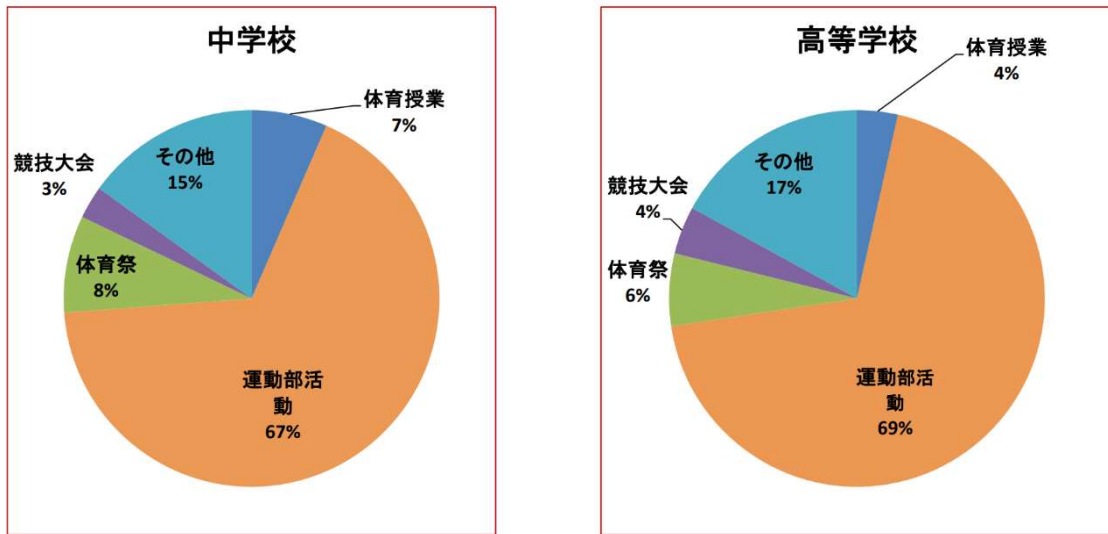


Fig.7.5 熱中症発生時活動状況[77]

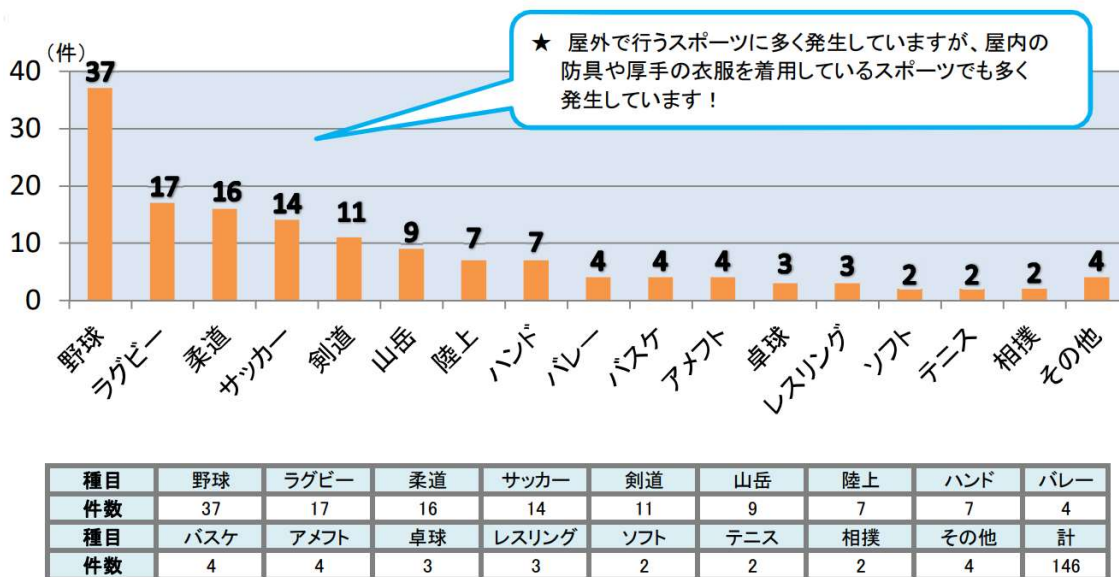


Fig.7.6 熱中症発生時部活動種目[76]

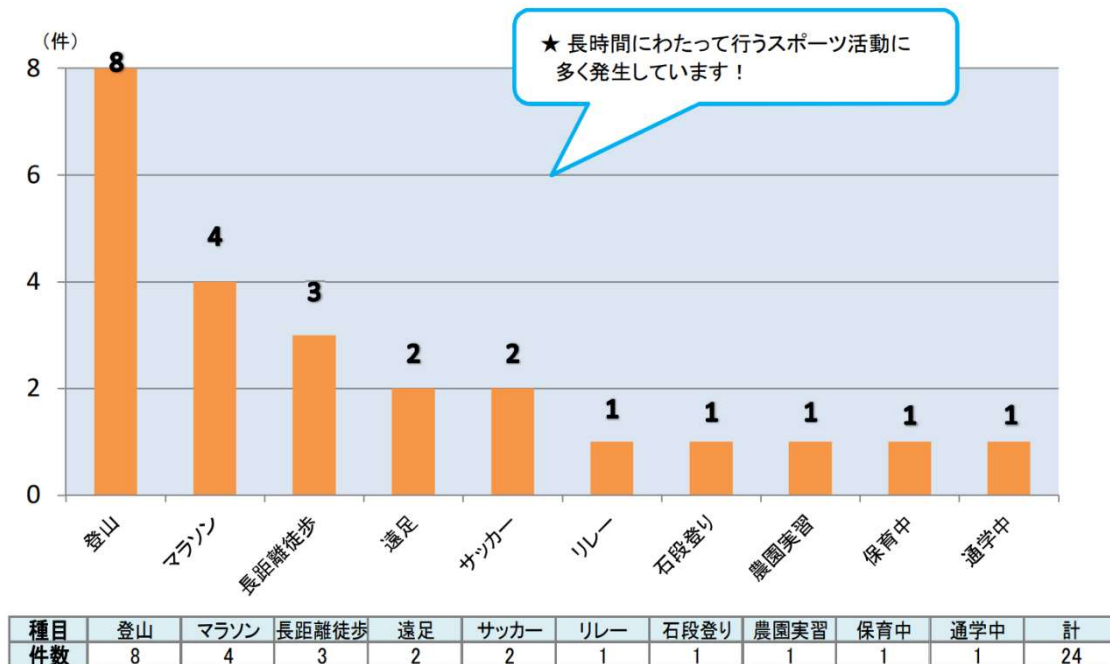


Fig.7.7 熱中症発生時部活動（部活以外） [76]

Fig.7.5から解るように、中高とも、部活動の熱中症発生が約70%と多い。

また Fig.7.6 より、野球、ラグビー、サッカーなど屋外スポーツでの熱中症発生が多いが、柔道、剣道、ハンドボール、バレー、バスケットボールなど屋内スポーツでも熱中症は発生していることがわかる。

剣道のように防具を付ける為水分を補給しにくかったり、バレー・バスケもゲーム中は水分補給が難しかったり、室内環境の為気流が少なく湿度も高くなる傾向となり、熱中症の発生につながっていると思われる。真夏の屋内スポーツでは、窓・扉を開け換気をよくすること、水分補給を積極的にすることが重要と考えられる。

また、Fig.7.7 より、部活動以外では、登山、マラソン、長距離競歩など屋外での長時間イベントでの熱中症発生がやはり多くなっているのがわかる。

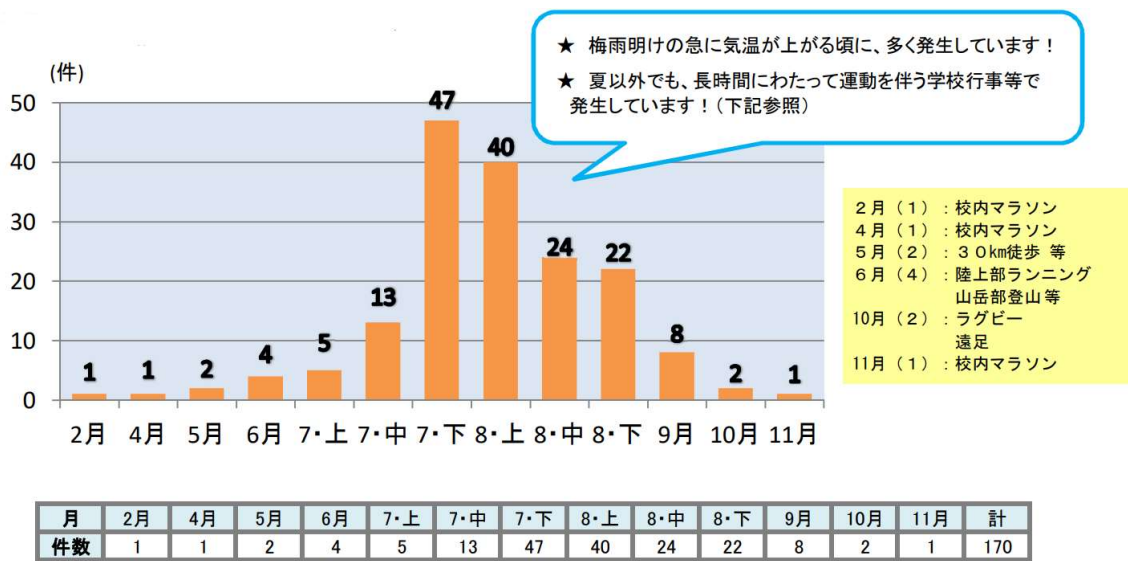


Fig.7.8 熱中症月別発生状況（昭和50年～平成29年） [76]

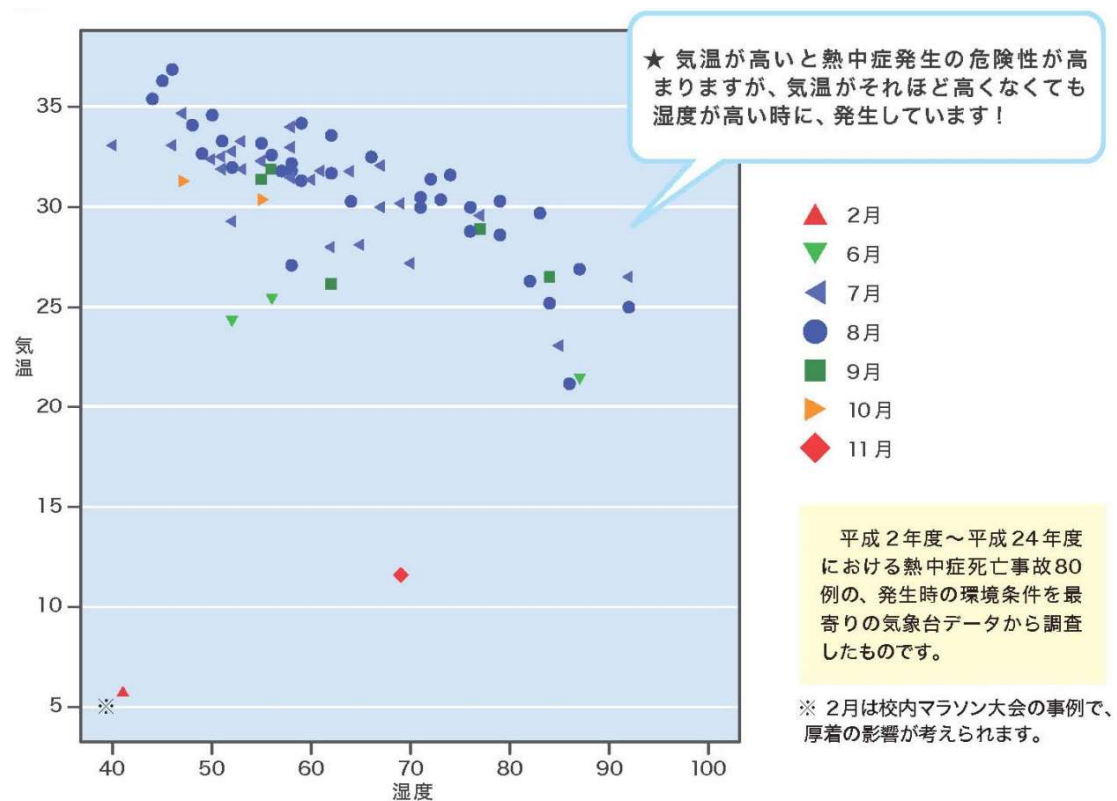


Fig.7.9 熱中症発生時の温度・湿度（平成2年度～平成24年度） [84]

熱中症発生の多い時期は、7,8月の真夏に多く、産業界の熱中症発生状況と同じである。熱中症発生時の気温と湿度の関係も、産業分野での様子と同じである。基本的には高温低湿で熱中症の発生が多いが、気温がそれほど高くなくても多湿であれば発生する場合がある。また6月は7.8月に比較し3°C程度低くても熱中症発生がみられており、暑さに対する慣れ（暑熱順化）の影響と考えられ、これも大人と同じ現象である。夏になる前（5,6月）の高温には十分な熱中症対策が必要である。

以上述べてきたように、熱中症による死傷者数の増加は、学校においても大きな問題であり、予防に向けた取り組みが必要である。中高での熱中症発生は、部活動時での発生が70%と多く、その中で25%を占め、群を抜いて発生が多いのは野球部である。部活動以外で熱中症発生が多いのは、学校行事であり、その中でも登山、マラソンでの発生が多い。学校では、体育の授業や行事では帽子を着用する。部活動での野球、学校行事での登山、マラソンでは、ほぼ帽子を着用する。このため現在はヘルメットに装着しているセンサや無線・制御回路をより小型にして、帽子に搭載できるサイズにできれば、学校における熱中症対策に大きく貢献できるのではないかと考えられる。

小型化のポイントは、回路系と電源付きファンの小型化であり、回路系は現在使用の汎用回路BOX（Raspberry Pi）を、周辺回路内蔵の無線マイコン1つで実現できる想定で小型化が見込めるが、小型電源付きファンをいかに実現するかがポイントで、実用化設計時に詳細検討が必要である。

熱中症予防帽子のイメージを Fig.7.10 に示す。システム例を Fig.7.11 に示すが、こちらは労働管理システムとほぼ同様のシステムで実現できるものと考えられる。



Fig.7.10 熱中症予防帽子

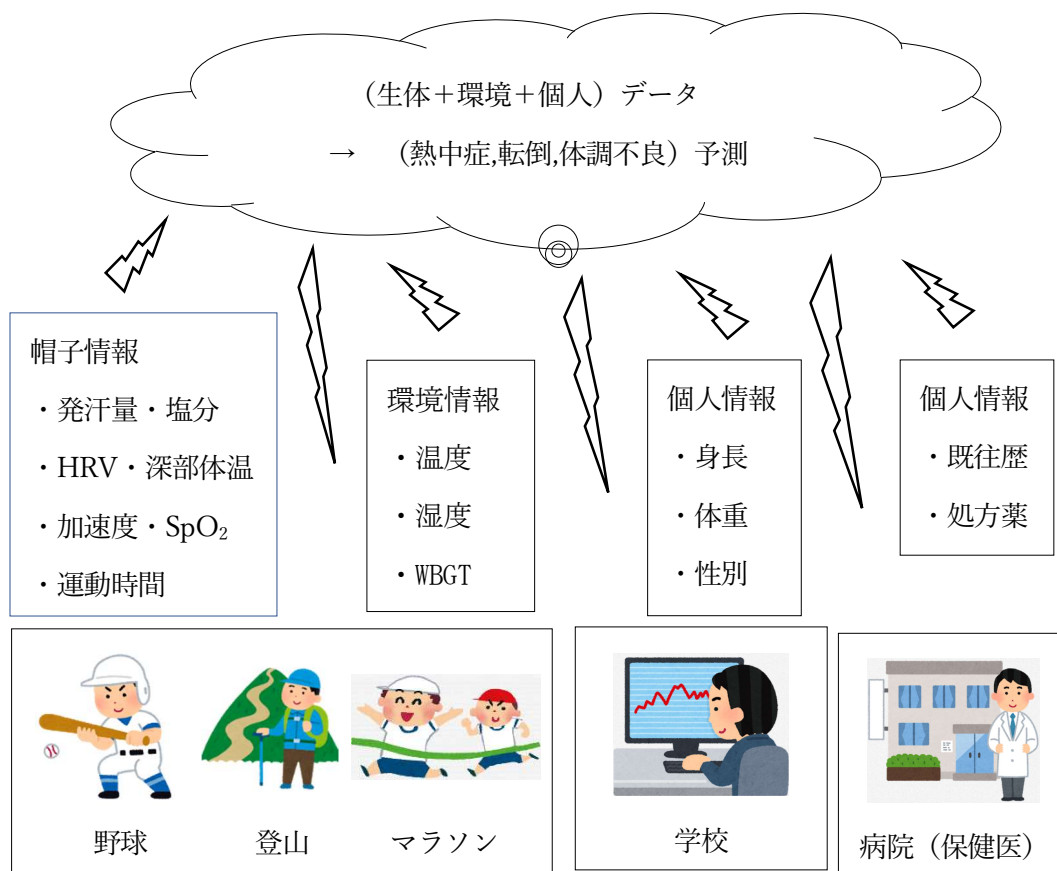


Fig.7.11 学校用運動・健康管理システム

## 7.6 まとめ

建設業のみならずヘルメットの装着義務のある産業を中心に、本研究で開発したヘルメット型発汗量計測デバイスが、熱中症予防に貢献できる産業分野を明らかにし、対象となる作業者が約500万人いることが判明した。

さらに、本研究で提案した統合型ウェアラブル熱中症予防デバイスシステムの応用展開として、熱中症予防はもちろん、各種作業における健康障害を予防するために必要なセンサと、予防のための警告を発生させる閾値を考察し、熱中症以外の労働健康障害を予防できる機能も付加した、ヘルメットデバイスによる、産業衛生管理システムを提案した。

具体的にはヘルメットに、加速度センサやSpO<sub>2</sub>センサを搭載することで、作業現場において多くの健康障害をも予測し警告を寄せられる可能性を提案した。

さらに学校・スポーツ分野における熱中症の実態を把握し、労働衛生管理システムを応用し、帽子と学校用運動・健康管理システムによる、学校スポーツにおける熱中症予防の可能性をも提案し、本研究によるデバイスやシステムによって社会貢献できる領域をさらに広げ

ることができることを示した。

## 参考文献

- [75] ミドリ安全株式会社 HP,保護帽着用が規定された作業範囲  
<https://www.midori-helmet.jp/wp/wp-content/uploads/3bb1bb1a8d94db15042501514f6059ae.pdf> (アクセス 2020年12月19日)
- [76]環境省 熱中症予防情報サイト,文部科学省における熱中症事故防止対策について  
[https://www.wbgt.env.go.jp/pdf/ic\\_rma/3003/mat3.pdf](https://www.wbgt.env.go.jp/pdf/ic_rma/3003/mat3.pdf) (アクセス 2020年12月19日)
- [77]環境省 熱中症予防情報サイト,部活動中の熱中症対策  
[https://www.wbgt.env.go.jp/pdf/library/library\\_13.pdf](https://www.wbgt.env.go.jp/pdf/library/library_13.pdf) (アクセス 2020年12月19日)
- [78]日本呼吸器学会 パルスオキシメータハンドブック (アクセス 2020年12月19日)  
[https://www.jrs.or.jp/uploads/uploads/files/guidelines/pulse-oximeter\\_medical.pdf](https://www.jrs.or.jp/uploads/uploads/files/guidelines/pulse-oximeter_medical.pdf)
- [79]国際標準人間工学規格 (ISO11226) (アクセス 2020年12月19日)  
[https://www.jsum.or.jp/committee/uesc/pdf/anzen\\_web.pdf](https://www.jsum.or.jp/committee/uesc/pdf/anzen_web.pdf)
- [80]厚労省 振動障害の予防のために (アクセス 2020年12月19日)  
<http://www.yamabiko-corp.co.jp/files/user/kioritz/news/090820-2a.pdf>
- [81] 森晃爾 総編集 産業保健マニュアル 南山堂
- [82] 独立行政法人労働者健康安全機構労働安全衛生総合研究所, 21 世紀の労働衛生研究戦略協議会  
[https://www.jniosh.johas.go.jp/about/council/doc/kadai\\_li.pdf](https://www.jniosh.johas.go.jp/about/council/doc/kadai_li.pdf) (アクセス 2020年12月19日)
- [83]厚生労働省,職場環境を整備改善したい (アクセス 2020年12月19日)  
[https://www.mhlw.go.jp/seisakunitsuite/bunya/koyou\\_roudou/roudoseisaku/chushoukigyou/shokuba\\_kaizen.html](https://www.mhlw.go.jp/seisakunitsuite/bunya/koyou_roudou/roudoseisaku/chushoukigyou/shokuba_kaizen.html)
- [84]日本スポーツ振興センター 学校安全Web (アクセス 2020年12月19日)  
[https://www.jpnsport.go.jp/anzen/Portals/0/anzen/anzen\\_school/H30nettyuusyoutPamphlet/h30nettyuusyout\\_all.pdf](https://www.jpnsport.go.jp/anzen/Portals/0/anzen/anzen_school/H30nettyuusyoutPamphlet/h30nettyuusyout_all.pdf)
- [85]国土交通省 建設業及び建設工事従事者の現状  
<https://www.mlit.go.jp/common/001180947.pdf> (2020年12月19日アクセス)
- [86]経済産業省 鉄鋼業の現状と課題 <https://www.mlit.go.jp/common/001180947.pdf>  
(2020年12月19日アクセス)
- [87]日本自動車工業会 自動車関連産業と就業人口  
[http://www.jama.or.jp/industry/industry/industry\\_1g1.html](http://www.jama.or.jp/industry/industry/industry_1g1.html) (2020年12月19日アクセス)

- [88] 経済産業省 主要製造業の課題と展望 (2020年12月19日アクセス)  
<https://www.meti.go.jp/report/downloadfiles/g70601a05j.pdf>
- [89] 警察庁 令和元年警備業概要 (2020年12月19日アクセス)  
<https://www.npa.go.jp/safetylife/seianki/statistics/reiwa1keibigaikyo.pdf>
- [90] 消防庁 <https://www.soumu.go.jp/shoubou/index.html> (2020年12月19日アクセス)
- [91] 林野庁 第1部 第III章 第1節 林業の動向(4) (2020年12月19日アクセス)  
[https://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/29hakusyo\\_h/all/chap3\\_1\\_4.html](https://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/29hakusyo_h/all/chap3_1_4.html)
- [92] ミドリ安全 頭部保護用インナーキャップ (2021年1月4日アクセス)  
[https://ec.midori-anzen.com/shop/e/ea087\\_002](https://ec.midori-anzen.com/shop/e/ea087_002)
- [93] 株式会社谷沢製作所 遮熱ヘルメットの効果について (2021年1月7日アクセス)  
<https://www.tanizawa.co.jp/columns/equipment/20130808-2>



## 第8章

## 結論

まず、第1章で研究の背景や目的を述べた。地球温暖化の進行に伴い、熱中症罹患者は年々増加しており、熱中症は今後益々大きな社会問題となると予想される。産業分野における業種別分類では、熱中症による死傷者数は建設業が最も多く、建設現場における熱中症リスク管理は非常に重要な問題となっているが、現在は科学的データに基づいた熱中症の労務管理が行われているとは言い難い。このため熱中症の実情や発症の機序について既存研究の検討を行ったうえで、科学的な労務管理に寄与し得る熱中症予防システムを構築することを目的に研究を行ったことを述べた。

第2章では既存情報から熱中症の実情や発症の機序について調査・研究を行った結果をまとめ、全身発汗量を把握することが熱中症予防に重要であることを述べた。

続く第3章では、本研究で考案したヘルメットを用いて頭部発汗量を計測する方法の原理について述べた。この原理がマネキンを使用した疑似人体頭部実験において成立するかの原理検証を行った結果、考案した計測方法による発汗相当量と実際に計測できた蒸発水分量との相関係数が、0.99であることを確認し、考案した原理モデルが正しいことを実証した。

第4章では、原理検証したヘルメット型発汗量計測デバイスを用い、まずヒトにおいても五酸化リン ( $P_2O_5$ ) の吸着シートを用いた直接的な蒸発水分量と、ヘルメットで計測された頭部発汗相当量が一致していることを確認した。そのうえで、より高温 (30°C) の環境下で、安静時におけるヒトでの検証実験を行い、被験者10名において計測を行った結果、計測した頭部発汗量と実際の全身発汗量との相関係数は、0.75と高い相関関係にあることを見出し、安静時において、頭部発汗量から全身発汗量が予測できることを述べた。

第5章では、実際の建設現場（建設会社の実験場）において、真夏 (30~34°C) に、9名の作業員にて、行動下におけるヒトでの検証実験を行った。その結果、計測された頭部発汗量と全身発汗量の相関係数は、0.87と高い相関関係にあることを見出し、安静時同様に行動下においても、頭部発汗量から全身発汗量が予測できることを実証した。さらに気温や行動時間、個人の伸長、体重等のパラメータも含め全身発汗量との重回帰分析を行い、重回帰式から全身発汗量を推測すると、実際の全身発汗量との相関係数が、0.97と高精度での全身発汗量推測が可能であることを見出し、本研究によるデバイスやシステムが十分に実用に足るレベルであることを確認した。

第6章では、開発したヘルメット型発汗量計測デバイスの残課題と、より高精度な熱中症早期罹患指標に関する検討を行った。より実用的なシステムとして完成させるための検討課題に関し、炎天下で心配される熱輻射のセンサ影響については、遮熱シールドと断熱材で回避

できる見込みがあった。

新たなセンサの搭載による、より高精度な熱中症早期罹患指標に関する検討については、深部体温と発汗量を、単純に熱中症の早期罹患検出と言った観点で比較すると、同時計測の結果からは、発汗量の方が有意に上昇し、適しているということがわかったが、深部体温・HRV・塩分に関しても、ウェアラブルで計測可能な熱中症の生体指標として有益であることがわかり、検討の結果ヘルメットへの搭載も可能であることから、発汗量とこれらの計測結果と併用することで、より高精度な熱中症早期罹患システムを提供することが可能になることがわかり、以上の検討結果を踏まえた、統合型ウェアラブル熱中症予防デバイスシステムの提案を行った。

第7章では、建設業のみならずヘルメットの装着義務のある産業を中心に、本研究で開発されたヘルメット型発汗量計測デバイスで熱中症予防に貢献できそうな産業を明らかにし、建設現場作業員326万人に加え、自動車製造業等の現場作業員を含め、合計511万人の現場作業員に、有益なデバイスシステムを提供できることを明らかにした。その上で、熱中症予防はもちろん作業における健康障害を予防するために必要なセンサ（SpO<sub>2</sub>、加速度）と、警告を発生させる閾値を考察し、他のバイタルデータから熱中症以外の労働健康障害を予防できる機能も付加した、統合型ウェアラブル労働衛生管理システムを提案した。さらに学校・スポーツ分野における熱中症の実態を把握し、労働衛生安全管理システムを応用し、発汗量計測を含むバイタルデータ計測機能を有する帽子による学校用運動・健康管理システムの提案も行い、本研究によるデバイスやシステムによって社会貢献できる領域をさらに広げることができることを示すと共に、本研究の更なる応用展開・発展の可能性について論じた。

本研究成果を、実用化するにあたっては、過酷な環境における検証を追加する必要がある。特に高湿度環境における、無効発汗の影響把握とその対策が、今後の課題となると考えられる。



# 付録

## 無線通信システムに関して

実用化を考慮した場合、センサの精度向上以外に、取得したセンシングデータを確実に無線伝送することも重要な課題である。その点に関し、検討した内容について論ずる。

## 1 最適無線方式の検討（無線障害や広大な現場における無線到達距離不足の回避策）

### 1.1 建設現場の実態把握

無線方式の検討をするにあたり、現場となる建設現場の「広さ」や「無線環境（木造か鉄筋か等）」が、どのような現場が一般的か調査を行った。まず建設会社の事業別売り上げ比率から、建設現場が概ね推定できると考え調査した。Table 6.3.1にある大手建設会社の事業別売上比率[付録\_1]を示す。またそれを図にしたものを、Fig.付録\_3.1に示す。

Table 付録\_1.1 建設事業別売上比率

事業	内訳	売上比率 (%)
住宅 45.8%	戸建住宅	11.3
	賃貸住宅	23
	マンション	8.3
	その他	3.2
施設 44.4%	商業施設	18.2
	事業施設	26.2
Life	リゾート ホテル等	9.8

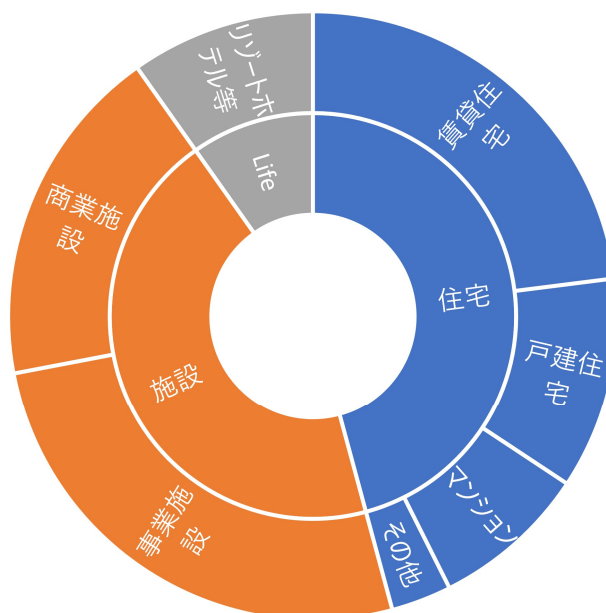


Fig.付録\_1.1 建設業事業別売上比率

住宅と施設が約半々であり、比較的小スペースでの建設現場が想定される住宅と比較的広範囲である施設案件が半々であり、できればどちらの現場でも無線方式を変えることなく対応したい。

現場の広さについてだが、戸建住宅は住宅建設計画により、Table 付録\_3.2のように世帯人数に応じた居住面積水準の目標が定められており、これによると概ね50m<sup>2</sup>~164m<sup>2</sup>が一般的な広さと考えられる。2階建てと考えられると高さは約6m程度、水平方向は15m程度までの範囲の無線到達距離が必要と考えられる。また近年は鉄筋住宅が増えており、作業現場は多くの鉄筋の中での作業となることが推測される。

Table 付録\_1.2 住宅建設計画法による誘導居住水準

区分	一般形誘導居住水準	都市型誘導居住水準
世帯人数	住戸専用面積	住戸専用面積
1人	50m <sup>2</sup> (約7.1m角)	37m <sup>2</sup> (約6.1m角)
2人	72m <sup>2</sup> (約8.5m角)	55m <sup>2</sup> (約7.4m角)
3人	98m <sup>2</sup> (約9.9m角)	75m <sup>2</sup> (約8.7m角)
4人	123m <sup>2</sup> (約11.1m角)	91m <sup>2</sup> (約9.5m角)
5人	158m <sup>2</sup> (約12.6m角)	122m <sup>2</sup> (約11m角)
6人	164m <sup>2</sup> (約12.8m角)	129m <sup>2</sup> (約11.4m角)

次に賃貸住宅の広さや環境について確認する。以下に宮城県に直近建築された賃貸住宅の例を示す。

Table 付録\_1.3 宮城県賃貸住宅案件[付録\_1]の概要

項目	概要
コンセプト	対震災からの復興のため、地域に貢献する賃貸住宅を建てる。
特長	美しい街並みを意識し、全棟3階建の8棟20プラン、108世帯が暮らすミニタウンを提案。建物の配置をずらして景色に変化をもたらすように配慮した。また、賃貸住宅の住人だけでなく地域に役立つ施設としてコンビニエンスストアも敷地内に設けている。
構造・規模	軽量鉄骨造、地上3階建（高さ10m程度）
敷地面積	8,305m <sup>2</sup> （約91m角程度）
間取り	1LDK・2LDK・3LDK



敷地面積は 8,305m<sup>2</sup>あり、戸建住宅と比較しかなり格段に広範囲となる。高さで 10m、水平方向では 100m程度の無線距離が必要である。また鉄筋の中での作業となるもの戸建住宅と同様と考えられる。

次に、事業施設の例を確認する。これも最近開発された、「大宮駅西口第3-A・D地区第一種市街地再開発事業」を例に事業建設案件について概要を紹介する。

Table 付録\_1.4 大宮駅西口第3-A・D地区第一種市街地再開発事業[付録\_2]概要

項目	概要
コンセプト	「魅力ある商業系施設・業務系施設を導入することで、本地区を含む周辺エリアの都市の魅力向上を促進するとともに、地域交流の場の整備を図る。
特長	<p>■交通環境、防災性の向上</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・道路拡幅に合わせて歩道と歩道状空を整備することで、良好な歩行空間を形成する。</li> </ul> <p>■街のにぎわいと回遊性づくり</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・歩行空間に沿って店舗を整備することによって、のにぎわいと回遊性のあるまちづくりを行う。</li> </ul> <p>■みどりと憩いのスペースづくり</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・様々な性格の居場所としての設えやイベントが行えるみどり空間を整備し、憩いのにぎわいづくりを行う。</li> </ul> <p>■昼夜間人口によるのにぎわいの向上を図る施設の整備</p>





・都市型住宅の整備によって夜間人口を増加させ、快適で利便性の高い就業空間を備えたオフィスを整備することにより、昼間人口を増加させる。昼夜ともに人が行き来するにぎわいのあるまちをつくる。

施行区域面積	約1.5ha	
建築敷地面積	約9,500㎡	(約97.5m角)
延床面積	約85,000㎡	
建築物の高さ	約100m	
主要用途	商業、業務、住宅、駐車場	
住宅の予定戸数	約230戸	
事業関係者	参加組合員予定者	東京建物株式会社 日本土地建物株式会社 大和ハウス工業株式会社



敷地イメージ図



計画図

敷地面積は 9,500m<sup>2</sup>と先に紹介した賃貸住宅と同様の広さだが、高さ方向が 10mであったものが 100m程度までを想定する必要がある。建設物中の鉄筋の量は、住宅より多くなるものと想定され無線環境としてはかなり厳しい状況と予想する。

最後に Life 事業（海外の特別なホテルの案件）案件について確認する。

事例として確認した案件は、ベトナム ハイフォンに、日系企業が運営するロングステイホテルがこのほど建設された案件である。日系企業による高品質な設備・サービス提供と利便性の高い立地によるアクセスの良さがポイントである。

Table 付録\_1.5 ベトナム ハイフォンのホテル案件概要[付録\_3]

名称	Hotel Nikko Hai Phong	Roygent Parks Hai Phong
所在地	No.1 Road 1, Waterfront City, Vinh Niem Ward, Le Chan District, Hai Phong City, Viet Nam (ベトナム ハイフォン市 レチャン区 ビンニエム街区 ウォーターフロントシティ第1号通り1号)	No.3 Road 1-Waterfront City, Vinh Niem Ward, Le Chan District, Hai Phong City, Viet Nam (ベトナム ハイフォン市 レチャン区 ビンニエム街区 ウォーターフロントシティ第1号通り3号)
延床面積	計 39,814 m <sup>2</sup>	
敷地面積	20,000m <sup>2</sup> (200m×100m) 程度と推定	
構造	鉄筋コンクリート造・地上 21 階 地下 1 階 (80m 程度と推定)	
客室数	250 室	152 室
付帯施設	宴会場・会議室	パーティールーム
	プール・大浴場・フィットネス・シミュレーションゴルフ等	
施工	株式会社フジタ	
着工	2017 年 12 月	
竣工	2020 年 3 月	
開業	2020 年 8 月 1 日	2020 年 4 月 18 日



外観写真 左：Roygent Parks Hai Phong 右： Hotel Nikko Hai

高さは 100m程度であり左記の物件と同程度であるが、敷地面積が推定 20,000m<sup>2</sup>と倍程度の広さがあり、海外のリゾートホテルとなるとより広い範囲にわたる建設物があっても不思議はない。

以上の調査結果から、無線として求められる仕様は、200m四方の範囲で、高さが 100m、鉄筋環境の中で、個々のヘルメットを認識でき、逐次発汗情報を無線伝送できること、となる。

## 1.2 最適無線方式の検討

以上の調査結果から、通信距離としては水平方向で 200m、高さ方向で 100m の範囲で、途中鉄骨が無数にある環境でもデータの欠落なく無線通信できることが要求仕様になりそうなことがわかった。次に、無線技術の中から適合する無線方式があるかどうか考察を行う。

使用に適する可能性のある通信手段と通信距離及び速度の関係を Fig.付録\_2.2 に示す。

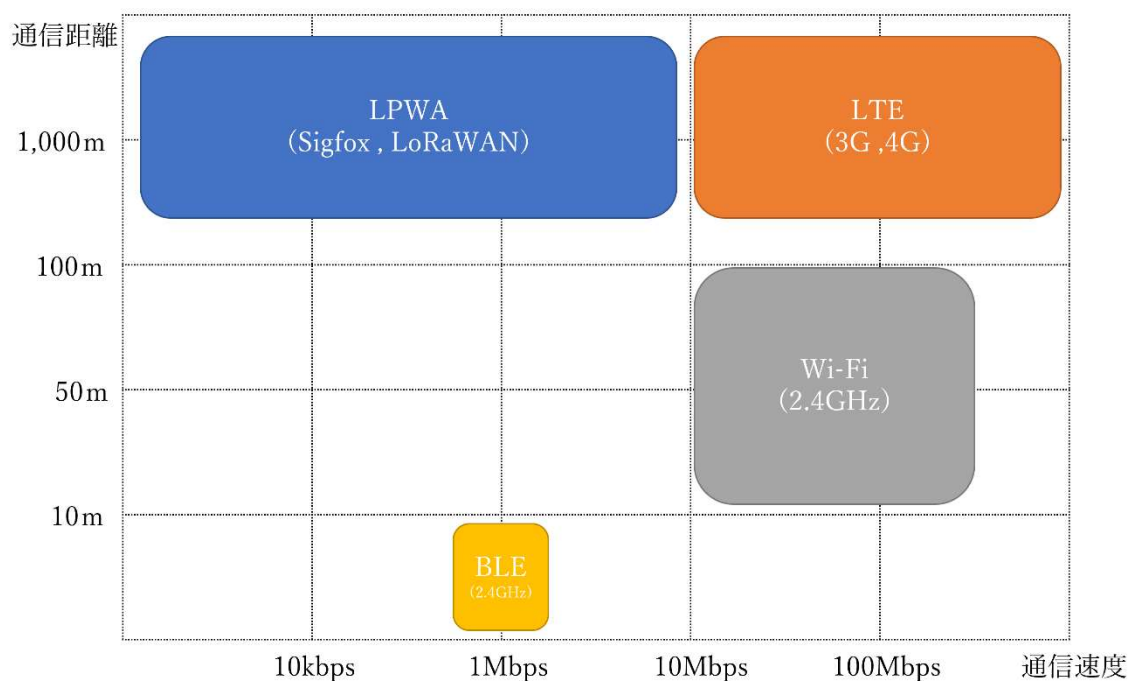


Fig.付録\_2.2 無線方式と通信距離及び通信速度

また、各通信方式について、特徴をまとめた表を Table 付録\_2.6 に示す。

Table 付録\_1.6 各種通信方式別の特徴

	LPWA		BLE	Wi-Fi	LTE
	Sigfox	LoRaWAN			
周波数	920MHz	920MHz	2.4GHz	2.4GHz	700/800MHz 1.5/2GHz
無線距離	50km	10km	10m	100m ※障害物あり 場合 10m 程度	6km
通信速度	100bps ※データ量 に制限あり	300～ 5Kbps	1～2Mbps	100K～ 30Mbps	37.5～ 150Mbps
消費電力	<20mW	<20mW	20mW 程度	300mW 程度	500mW 程度
ゲートウェイ	不要	要	要 (スマートフォン)	要	不要
コスト	100 円/月 程度	数百円/月 程度	-	-	500～3000 円/ 月程度

可能性のあると考えられる通信方式は、LPWA、LTE、Wi-Fi、BLE の 4 種類である。

まず LPWA についてであるが、LPWA は低速だが「長距離、低コスト、低電力」を実現できる通信方式であり、IoT 分野では非常に魅力的な数新方式である。LPWA の中でも複数の方式が存在し、その中でも採用の可能性が高い Sigfox と LoRaWAN について説明する。

Sigfox は周波数帯 920MHz、通信速度 100bps の無線方式である。また無線ネットワークとクラウドサービスをセットで提供してくれ、それも最も安価なケースで 100 円/機器で済む。しかし通信回数 (140 回/日) や通信量 (12byte/回) に制約があり、要求仕様が通信回数 (1440 回/日) であり通信量 (32byte/回) であるため、採用する事ができない。LoRaWAN も周波数帯 920MHz の通信方式である。通信速度も Sigfox より自由度があり、センサ関連の IoT ビジネ

スを実現するには十分な速度を選択でき今回の要求仕様も満足する。ただし LoRaWAN は Sigfox と違って単に規格が定められているだけであり、自分でシステムを構築するか事業者が提供するサービスを利用する必要がある、それを現場毎に検討し構築する手間は必要となる。

次に LTE について説明を行う。LTE は携帯電話などで普及している通信で 700/800MHz 帯及び 1.5/2GHz 帯の通信方式である。通信距離、速度ともに申し分ない。しかし消費電力が大きく、また専用に契約するのであればコストもかかることになり、IoT 用途には通信方式としては申し分ないが、消費電力とコスト面から考えられると採用は難しいと考えられる。また Wi-Fi も同様のことが言えそうで、すでに普及した無線方式であり各方面で活用されており、通信速度等問題無いが、その分消費電力も大きい。また無線距離範囲がおおよそ 100m であり、障害物等があった場合は 10m 程度になってしまう場合もあり、今回の要求を満足しない。

BLE について説明を行う。Bluetooth はパソコンと周辺機器の無線方式として使われてきたが、主にスマートフォンと周辺機器との無線接続を目的に、Bluetooth Low Energy(BLE)が制定され、スマートフォンの普及と共に広まった。BLE と Wi-Fi は同じ 2.4GHz の周波数帯でも異なるチャンネルを使うので、それぞれの電波は干渉しないようになっている。また 2 つのデバイスが共通のチャンネルの電波を同時に送信しようとした場合、BLE は送信開始前に別のデバイスが送信を開始しようとするチャンネルの利用を確認し、同じチャンネルで送信を行わないようにするキャリアンスという仕組みによって、電波の干渉を防いでいる。BLE はスマートフォンの接続を前提としており、常時携帯しているスマートフォンを介して通信を行うと考えれば、通信距離はあまり気にする必要はなく、消費電流も少なく、通信量もスマートフォンの契約料の範囲内で賄うことができ余計な費用発生もない為、IoT デバイス向けの通信方式としても有力な候補であると考えられる。

以上述べてきたことから今回のケースに最適な通信方式を考察すると、まずデータ量の観点から Sigfox は採用できない。通信距離の観点から考察すると、LoRaWAN か LTE が適しているが、LTE は消費電力面から採用できない。また現在 Wi-Fi を採用しているが、今までの実験においても、金属等の障害物がある環境では安定してデータ通信できず、時々接続エラーが発生していることから、採用は難しい。以上の考察から、適した無線方式は LPWA の LoRaWAN が有力と考えられる。ただし現場において、自分でシステムを構築する必要があり、現場ごとにゲートウェイの設置検討等を検討しなければならない状況が考えられ、それを考えれば、現在ほとんどの人がスマートフォンを所有しており、ヘルメットに BLE を搭載し、BLE を搭載したスマートフォンを経由して、自動的にクラウドにデータが上がる仕組みが、現場環境にか

かわらず、発汗データがアップロードできるため、もうひとつの有力候補であると考えられる。

## 2 まとめ

実用化に向けて課題となりそうな無線通信システムに関して課題となる要因を拾い上げ、対策を検討した。

無線性能の要求仕様は、水平方向で 200m、高さ方向で 100m の範囲で、鉄骨が無数にある環境でデータ通信できることであり、「LoRaWAN+独自システム」もしくは「BLE+スマートフォン」による無線方式が適していると考えられる。

## 参考文献

[付録\_1]大和ハウスグループ IR情報

<https://www.daiwahouse.com/about/digest.html>

[付録\_2]大和ハウス工業 賃貸住宅事例紹介

<https://www.daiwahouse.co.jp/tochikatsu/d-room/case/case42.html>

[付録\_3] 大和ハウス工業のニュースリリース一覧

<https://www.daiwahouse.com/about/release/house/>





# 研究業績

## 【国際会議（査読有り）】

1) **Tsukasa Kosuda**, Yoshiaki Nakajo, Konosuke Sasagawa, Yuto Nishikai, Shunji Shimizu, Yoshinori Kumita, Toshihiko Kondo, Nobuaki Hashimoto, “Development of a helmet-type wearable device capable of measuring perspiration during various activities”, ICEP2019 Proceedings 2019, pp138-143

## 【学術論文】

2) **Tsukasa Kosuda**, Konosuke Sasagawa, Kanako Minauchi, Nobuaki Hashimoto, “Estimation of whole-body perspiration in a hot environment using a perspiration measurement helmet device during various activities”, Trans. JIEP, vol.13, 2020, E20-002-1-E20-002-4

3) **Tsukasa Kosuda**, Konosuke Sasagawa, Kanako Minauchi, Nobuaki Hashimoto, “Development of a helmet device capable of measuring perspiration during activity and the possibility of new index for the early detection of heat stroke”, Trans. JIEP, vol.13, 2020, E19-018-1-E19-018-11

## 【学会発表（口頭）】

1. **小須田 司**, 笹川 倅之介, 清水 俊治, 橋元 伸晃他, “行動下発汗量計測機能を有するヘルメット型デバイスの開発”, 日本電子回路工業会 2019 JCPA Show アカデミックプラザ, 2019.06.05
2. **小須田 司**, 笹川 倅之介, 橋元 伸晃, 井上 拓晃, 清水 俊治, “行動下発汗量計測機能を有するヘルメット型ウェアラブルデバイスの開発”, 第 26 回バイオメカニズム・シンポジウム(2019), 2019.07.06
3. **小須田 司**, 橋元 伸晃, “行動下発汗量計測機能を有するヘルメット型ウェアラブルデバイスの開発”, 公社)日本産業衛生学会 温熱環境研究会, 2019,10.26
4. **小須田 司**, 笹川 倅之介, 橋元 伸晃, “行動下発汗量計測可能なヘルメット型デバイスの開発と新たな熱中症罹患早期推定指標への適用可能性”, 第 30 回マイクロエレクトロニ

クスシンポジウム MES2020, 2020,9.17, pp91-94

【受賞】

1. 日本電子回路工業会 2019 JCPA Show アカデミックプラザ賞, 2019.06.05

【特許（出願中）】

1. 特願 2020-034295, 橋元 伸晃, 小須田 司, 組田 良則, 近藤 敏仁, 皆内 佳奈子, “熱中症予防システム”: (内容) 暑熱労働危険度判断システム
2. 特願 2020-034000, 橋元 伸晃, 小須田 司, 組田 良則, 近藤 敏仁, 皆内 佳奈子, “全身発汗量推定システム及び熱中症予防システム”: (内容) 頭部発汗量から全身発汗量推定
3. 特願 2020-034296, 橋元 伸晃, 小須田 司, 組田 良則, 近藤 敏仁, 皆内 佳奈子, “全身発汗量推定システム及び熱中症予防システム”: (内容) 多変量解析による発汗量推定

# 謝辞

本研究を進めるにあたり、3年間 早朝から休日まで、懇切なるご指導とご鞭撻を賜りました公立諏訪東京理科大学 橋元伸晃 教授 に 謹 ん で 感 謝するとともに深くお礼を申し上げます。

またご多忙中にもかかわらず、本論文の審査をしてくださり、有益なご教示とご指導を頂きました松江英明教授、大島政英教授、三代沢正教授、平田幸広教授に深く感謝し、厚くお礼を申し上げます。

産業医科大学の堀江政知教授におかれましては、日頃から研究に関しご指導を頂いておりますうえに、外部論文審査員までお引き受けいただき、さらにはお忙しい年末年始に、直接度指導頂きましたこと、心から感謝致しております。ありがとうございました。

また共同研究先であり現場実験を引き受けて下さいました株式会社フジタの皆様、特に組田良則執行役員、皆内佳奈子様、株式会社高環境エンジニアリングの近藤敏仁社長にご協力いただきこそ、本論文を書くことが出来ました。心から感謝致しております。

同じく共同研究先であり当方の製作致しましたヘルメット型発汗量計測デバイスを活用し今も実験を行って頂いております産業医科大学の永野千景先生始め、実験に係わって頂いております関係者の皆様に、深くお礼申し上げます。

また昨年まで公立東京理科大学の清水俊治教授、井上拓晃助教にご指導いただき、清水研究室の皆様にはヒト実験にもご協力いただき、ありがとうございました。

そして実験等全面的に協力いただきました橋元研究室の皆様、特に笹川倭之介さん、利根川雄也さん、卒業生の中條良亮さんのおかげで論文を書き上げることができました。心から感謝申し上げます。ありがとうございました。

最後に、毎日常生活面で全面的に協力頂いた家族に、感謝致します。