

No.建 F01 空調のドラフト評価のための乳児頭部熱モデル

蔵澄研究室（建築・住居分野）A19AB013 伊東真希 A19AB130 増田実祐 A19AB144 渡邊紗佑里

1. はじめに

近年、人口の増加と経済活動の活発化などにより、地球の再生作用の限界、地球環境容量、あるいはエネルギー・資源の有限性が顕在化し、地球温暖化やヒートアイランド現象などの地球環境問題が発生している。ヒートアイランド現象に地球温暖化現象が加わると都市の高温化現象が発生し、熱帯夜の日数の増加や都市部の最高気温が38℃を超える原因となる[1]。

このような厳しい温熱環境から逃れるために、近年、家庭だけでなく、自家用車や公共施設、公共交通機関でも冷暖房を使用する機会が増加している。公共での冷暖房温度は多くの人に対応するため設定されているが、体感温度に個人差があることから、公共での冷暖房は全員にとって適切な温度とは限らない。

冷暖房による寒暖差で体調を崩さないためには、室内外の適気温差を5~7℃にする必要がある[2]。しかし、気温が上昇すればするほど、空調で温度を下げなければ、快適であると感じられなくなる。したがって、身体にとっての適正温度差を維持することが困難となる。また、空調を使用し、繰り返し温度を下げ続けると、空調内の冷却コイルが限界を迎え、代替としては風量でエネルギーを補うこととなる。その結果として、空調の風量が多くなり、人体はドラフトの影響を受けやすくなる。ドラフトの影響を受けることによる体調を崩す症例として、冷房病や自律神経失調症などが挙げられる[3、4]。仮にドラフトの影響を受け、体調を崩したとしても、大人であれば症状に対して対処し、予防することができる。しかし、意思伝達能力が低い乳児は、自身の症状を訴えて対処することができない。このことから、保護者の感覚により乳児の温熱環境が決定される[5]。しかし、大人と乳児の温熱感覚は違うため、快適さに差異が生まれる[6]。よって温熱評価を数値化し、乳児に対するドラフトの影響を評価する必要がある。

徒前の研究では、ドラフトについて多くの事柄が明らかとなっている。半澤の研究[7]では、人間は受ける風速の差が大きいほど不快感を示すことが明確にされている。堀の研究[8]では、人間が快適と感じる作用温度は足首より頭部の方が4℃低いことが示されている。また、田辺の研究[9]では、大人の頭部温熱感覚は、他部位の温熱感覚より敏感なことが明らかとなっている。そして、フーダらの研究[10]では、体表面上の温度と、温度感覚

の感度の差が顕著だった場合に温冷感が敏感となることが示されている。しかし、いずれも大人を対象とした研究であり、乳児を対象とした研究はされていない。以上より、乳児のドラフト評価のための研究は進んでいないことがいえる。

乳児のドラフト評価の研究が盛んに行われていない理由として、倫理的な問題がある。温熱環境の実験では、被験者実験を行うことが一般的であるが、乳児は大人と比べ身体が脆弱であり、体力的な観点からしても大きな負担がかかることが予測される。したがって、過酷な温熱環境下で行われる実験では、乳児の身体は耐えることが不可能であり、乳児の温熱環境に関連した実験では、乳児の代替となるサーマルマネキンを用いることが最適解といえる。

サーマルマネキンはさまざまな温熱環境の研究に利用される。サーマルマネキンを使用することで、被験者を用意せずとも実験を行うことが可能である。また、大人を対象とした被験者実験とサーマルマネキンを使用した実験とは、相応の結果を示すことが明らかとなっている。したがって、現在、サーマルマネキンは、個数は少ないものの世界中の企業で作製されている。

デンマークのP. T. TEKNIK社では世界標準ドライマネキンを開発している。このドライマネキンは、大人をモデルとしており、部屋や車両の熱快適性や衣服の断熱特性を分析することが可能である[11]。日本においては、京都電子工業株式会社が大人をモデルに発汗サーマルマネキンを開発しており、各部位ごとに温度や発汗量を制御することが可能となっている[12]。また、5か月を対象とした乳児のマネキンもパイロット的に開発している。アメリカにあるmeasurement technology northwest社は、大人を対象としたニュートンマネキンとアンディサーマルマネキンの開発に加え、9か月の乳児を対象としたサーマルマネキンの開発・販売をしている[13]。以上が既存のマネキンとなるが、大人をモデルにサーマルマネキンを開発していることが多いといえる。また、乳児をモデルとしたサーマルマネキンが開発されてはいるが、寸法学的な数値を基に人体の形状を構成しており、伝熱面積を根拠にした作製はされていない[12、13]。

本研究では、ドラフトの特徴である皮膚が覆われていない箇所は敏感に反応するというに着目した。そして温熱環境の影響を受けやすい頭部を対象としたモデル

を開発し、乳児の温熱環境の解明に寄与することを目的とした。本研究の研究範囲は、伝熱面積を根拠とした乳児頭部熱モデルの作製と皮膚温を制御するための制御係数の決定とした。

2. 乳児頭部熱モデルの構築

2.1 モデルの選定

乳児頭部熱モデル構築のために参考とした被験体は奥村らの研究[14]を基に選定した。したがって、図1に示す医療シミュレーター(日本スリービー・サイエンティフィック製、W17002、アジア人系ベビーケアモデル(男児))を人体モデルとして採用した。

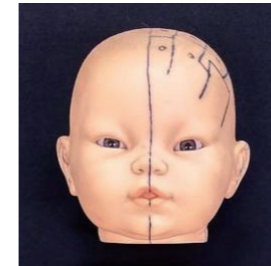


図1 アジア人系ベビーケアモデル(男児)

2.2 乳児頭部熱モデルの構築

乳児頭部熱モデルの断面構造を図2に示す。



図2 乳児頭部熱モデルの断面図

3層の間は絶縁体である変成シリコーン系弾性接着剤(住友大阪セメント製、電気絶縁性高熱伝導接着剤ジーマ・イナスX2)を挟み、それぞれ電氣的に短絡しないように絶縁した。

乳児頭部熱モデルの構築にあたって、取り扱いしやすいう、前頭部と後頭部に分けて作業を行った。なお、前頭部と後頭部の作製手順は同一のものとし、作業は同時並行で行った。

乳児頭部熱モデルの土台を構築するため、3Dスキャナ(SHINING 3D製、EinScan-S、精度0.05mm)を用い、頭部表面上の任意の点の座標データを求めた。座標データを基に、3Dプリンタを用い、耐衝撃性ポリスチレン樹脂で土台を出力した。図3のように医療シミュレーターと乳児頭部熱モデル(完成品)のサイズを同等とするため、モ

デルの土台は一回り(2mm)小さくした。出力した後、マンガニン線の接着を容易にするため、瞬間接着剤(KONISHI製、アロンアルファ 速攻多用途 EXTRA)で網目状に凹凸をつけた。そしてマンガニン線(Nilaco製、マンガニン線0.30mm)をモデルの土台に配線し、養生テープで仮止めをした。その際、マンガニン線が互いに接触すると電氣的に短絡する危険性があるため、5mm程度の間隔を取った。その後、仮止めしたマンガニン線を瞬間接着剤で固定した。マンガニン線配線時の乳児頭部熱モデルを図4に示す。マンガニン線が接着面から浮いていないことを確認し、変成シリコーン系弾性接着剤を表面部に満遍なく被覆した。被覆した後、変成シリコーン系弾性接着剤を乾燥させるために1~2日間置いた。その後、アルメル線(Nilaco製、アルメル線0.10mm)とマンガニン線の接触を確実に防ぐため、マンガニン線が露出している箇所に油性ペンで印をつけ、印が隠れるように変成シリコーン系弾性接着剤で被覆した。乾燥後、さらに絶縁性を高めるために変成シリコーン系弾性接着剤を表面部に再度被覆した。数日後、アルメル線を作製中の乳児頭部熱モデルに配線した。固定方法はマンガニン線の配線時と同様に行った。アルメル線配線時の乳児頭部熱モデルを図5に示す。そして、固着したアルメル線を、変成シリコーン系弾性接着剤で被覆した。アルメル線が露出していないことを確認し、乳児頭部熱モデル本体の構築を完成させた。完成した乳児頭部熱モデルを図6に示す。



図3 出力した3Dモデル(左)

図4 マングニン線配線後(右)

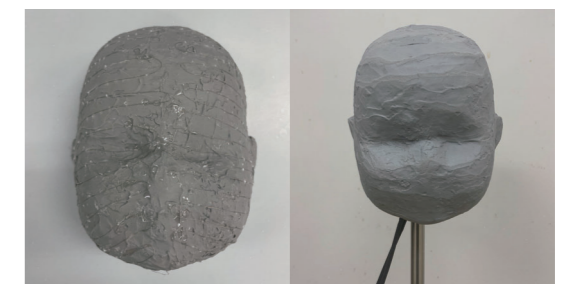


図5 アルメル線配線後(左)

図6 完成した乳児頭部熱モデル(右)

2.3 伝熱面積の検証

伝熱面積を根拠とした乳児頭部熱モデルの妥当性を検証するために、乳児頭部表面積と体表面積から面積比率を求め、従前の研究との比較を行った。伝熱面積は、体表面積との接触がなく、対流伝熱面積となる乳児頭部表面積を対象とした。乳児頭部表面積の確認は、平面展開の容易さや、高精度かつ短時間に体表面積を算出する必要性から、蔵澄ら[15-20]が用いた体表面積実測方法を採用した。

2.3.1 実測計画

不織布のサージカルテープ(NICHIBAN製、サージカルテープー21N)を、完成した乳児頭部熱モデルへ貼付した。図7のようにサージカルテープの重複している部分を囲み、貼付範囲の確認を行った。次に囲われた部分を抽出し、表面積の該当箇所を判別できるようにした。そして、乳児頭部熱モデルに貼付したサージカルテープを剥離し、評価用のシートに貼付し替えた。加えて、面積算定用の75mm角の色紙を合わせて貼付した。次に、サージカルテープと色紙を貼り付けた評価用のシートを、画像として処理するためにスキャナでコンピュータに取り込んだ。Adobe製のPhotoshopにて、範囲設定した部分と色紙を着色し、ピクセル数を求めた。そして、面積が既知の75mm角の色紙と乳児頭部熱モデルのピクセル数の比から、乳児頭部の表面積を算出した。

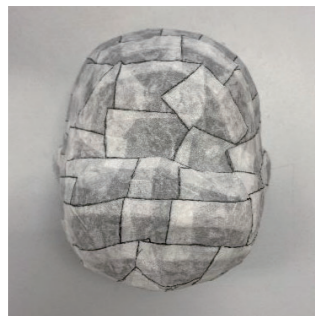


図7 表面積の測定

2.3.2 実測結果

乳児頭部熱モデルの表面積は表1の通りとなった。

表1 ピクセル数と面積の実測結果

	表面積[px]	表面積[cm ²]
前頭部	2.80×10 ⁵	3.18×10 ²
後頭部	1.74×10 ⁵	1.98×10 ²
計	4.55×10 ⁵	5.16×10 ²

2.3.3 伝熱面積の検証

本研究の乳児頭部の面積比率と、越智[21]や大城ら[22]、小林ら[23]、宮島[24]の研究で実測された乳児頭部の面積比率の比較を表2に示す。

本研究では頭部のみを作製しているため、体表面積が不明である。したがって、体表面積は藤本ら[25]の算出式を用い、2,790 cm²となった。体表面積算出に必要な身長と体重は、医療シミュレーターの身長より、厚生労働省の乳幼児身体発育調査[26]の月齢で1-2箇月程度を参考とした。

表2 乳児人体の既往研究との比較

	著者	越智[21]	大城[22]	小林[23]	宮島[24]	
頭部[cm ² /cm ²]		0.185	0.254	0.204	0.199	0.185

本研究の表面積は、従前の研究による算定結果の範疇となったため、乳児頭部熱モデルの形状の妥当性が検証された。

3. 制御回路

3.1 発熱回路

本研究で扱うAD/DA変換ボードの入出力可能電圧を考慮し、抵抗値は、各部位ごとにかかる最大電圧を10V以下になるように調整した。図8に発熱回路図を示す。R1、R2の組み合わせは数多あるため、R2を任意の値の24kΩとした結果、R1は8kΩとなった。したがって、8kΩに近い抵抗の段階位置となる8.2kΩの抵抗器を使用した。分電による電力消費を抑制するために、R1とR2はマンガニン線の抵抗よりも顕著に大きく設定した。

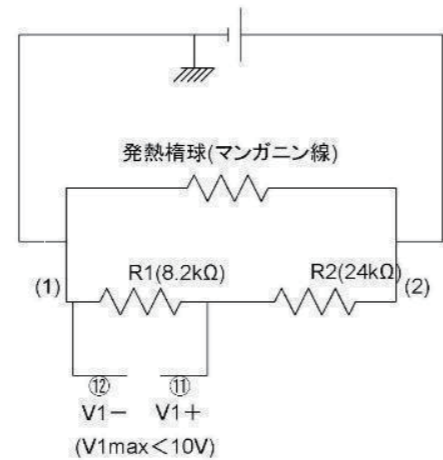


図8 発熱回路図

3.2 温度計測回路

温度計測回路の抵抗値は、ホイートストンブリッジ回路により、R3:R4=R5:R6=1:1となるように定めた。R3は、皮膚温に近い30℃のアルメル線の抵抗値をテスト(HIOKI製、デジタルマルチメーター-DT4281)で計測し、前頭部は91Ω程度、後頭部は70Ω程度とした。R4は、R3の数値に近い抵抗器を選び、前頭部を91Ω程度、後頭部を61Ω程度とした。また、アルメル線であるR3の抵抗値は温度によって変化する性質があるため、R3:R4は一定とならない。したがって、R5とR6は可変抵抗を無視するために抵抗値を顕著に大きく設定した。また、

R5とR6の組み合わせは数多あるため、R5を任意の値の75kΩとし、R6は制御範囲内である±10Vに収まるように抵抗値を選択した。その結果、前頭部・後頭部のR6はそれぞれ、68kΩ程度と10kΩ程度、47kΩ程度と30kΩ程度となった。図9と図10に温度計測回路図を示す。

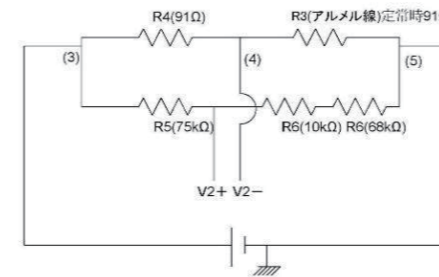


図9 温度計測回路図(前頭部)

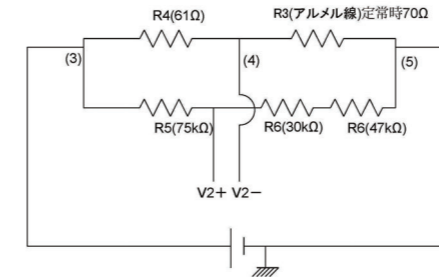


図10 温度計測回路図(後頭部)

3.3 回路の検証

基盤に電源電圧35Vを流したところ、抵抗にかかる電圧がコンピュータ読み取り範囲±10V以内に収まった。よって、選定した抵抗値と回路の妥当性が確認された。

4. 乳児頭部熱モデルの制御

4.1 実験計画

温度制御係数を明らかにするために、乳児頭部熱モデルの表面温度と出力電圧を計測し、その関係を明らかにした。環境実験室の中央付近に、乳児頭部熱モデルを設置した。環境実験室の実測機器の配置を図11に示す。環境実験室は、2,500mm×2,400mm×2,200mmの床面積6m²、容積13.2m³となっている。コンベンショナル式の空調機が設置され、壁面より吸排気が行なわれる。均質な温熱環境条件となるように、壁と天井には薄手のカーテンが設置されている。

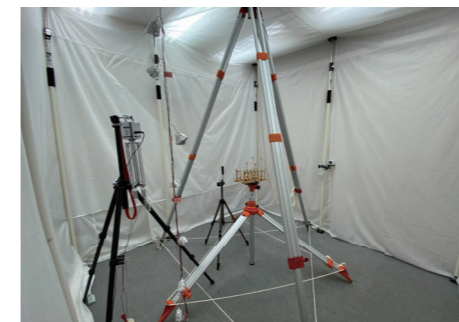


図11 実測機器の配置

環境実験室の設定室温は20℃、30℃、40℃とした。定常状態となった乳児頭部熱モデルの表面温度は、熱平衡より室温と同値として扱った。定常状態を確認した後に、室温とアルメル線の電圧を計測した。室温の計測にはサーミスタ(グラム製、LT-ST08-00)とデータロガー(グラム製、LT-8A)を、電圧の計測には16bitA/D変換ボードと自作のプログラムを用いた。

4.2 実験結果

実験日の気温・湿度の関係より事前に設定した室温に近い室温で定常状態を目指した。室温と乳児頭部熱モデルの表面温度の定常状態には、8時間程度を要した。

表3に乳児頭部熱モデルの室温とアルメル線の計測電圧を示す。図12に室温とアルメル線の計測電圧との関係を示す。

表3 室温とアルメル線の電圧の実測結果

気温[°C]	計測電圧[V]	
	前頭部	後頭部
37.7	-3.24	1.22
30.9	-4.33	0.705
25.5	-5.15	0.253

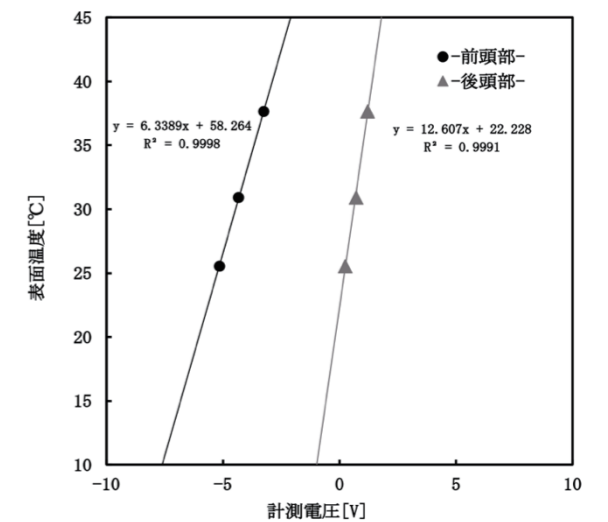


図12 計測電圧と表面温度との関係

表3より、乳児前頭部において、25.5℃から30.9℃の5.4℃の温度変化では0.82Vの電圧の変化があり、30.9℃から37.7℃の6.8℃の温度変化では1.09Vの電圧の変化が見られた。乳児後頭部において、25.5℃から30.9℃の5.4℃の温度変化では0.447Vの電圧の変化があり、30.9℃から37.7℃の6.8℃の温度変化では0.52Vの電圧の変化が見られた。

図12より、乳児頭部の表面温度と計測電圧にはほぼ線形の関係があることが分かった。線形回帰により、温度制御係数を明らかにした。

4.3 考察

温度制御係数を算出したことで、乳児頭部熱モデルの表面温度の制御が可能となった。前頭部と後頭部の表面温度が同一でありながら、アルメル線にかかる電圧に差が生じた原因として、配線したアルメル線の長さが考えられる。前頭部は後頭部より眼や鼻といった表面の凹凸部が多いため、配線したアルメル線が長くなり、かかる電圧も大きくなったと推測される。

5. 制御の検証

5.1 実験計画

PID 制御により乳児頭部熱モデルの設定温度と表面温度の一致状態が維持できるかの検証を行った。乳児頭部熱モデルの温度数値と PID 制御数値の変動を確認した。また、乳児頭部熱モデルにおける表面温度の変化傾向を観察するため、サーモグラフィカメラ InfiRayGo (iRay technology 社) を用いた。そして設定温度は人体の皮膚温に近い 34.0°C を採用した。

5.2 実験結果

前頭部は 1 分 20 秒で、後頭部は 2 分 10 秒で 34°C 付近まで表面温度が上昇した。また、前頭部は 1 分 15 秒で、後頭部は 2 分で PID 制御が開始され、PID 値が小さくなり、表面温度の変動が小さくなっていることが得られた。図 13 に計測時間と計測表面温度との関係を示す。設

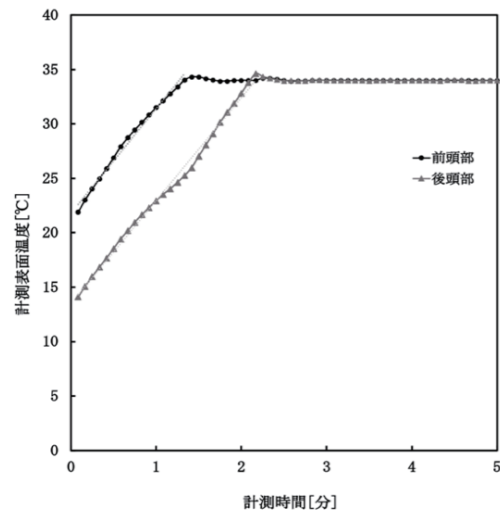


図 13 時間ごとの温度変化

定温度が持続されていることから、PID 制御が正常に機能しているといえる。図 14 - 図 17 にサーモグラフィカメラの実測画像を示す。実験開始当初は、図 14 に示す様に全体的に緑色で表面温度は低かったが、次第に額の部分は赤く染まり、頭頂部は黄色く、頬の部分は白く表現された。そして、図 17 に示される様に、37 分 34 秒には乳児頭部熱モデルの表面温度が 34°C 近傍の表現色に表示された。

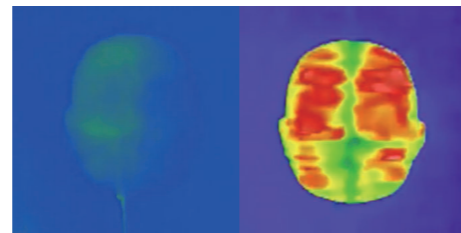


図 14 開始直後の赤外線画像(左)

図 15 開始 1 分後の赤外線画像(右)

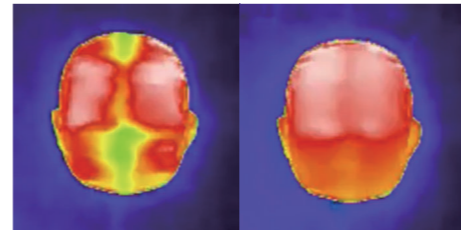


図 16 開始 2 分後の赤外線画像(左)

図 17 開始 37 分後の赤外線画像(右)

5.3 考察

作製した乳児頭部熱モデルは前頭部の頬が最も温度上昇しやすく、頭頂部は比較的溫度上昇し難いことが明らかとなった。頬の部分は凹凸部分が少ないため、マンガニン線を上手く配線できたと考えられる。頭頂部の温度上昇に時間がかかった原因としては、部屋の冷涼な空気が乳児頭部熱モデルに当たり、ダウンフローになったことが推測される。また、後頭部は前頭部より温度上昇に時間を要したが、実験開始時の表面温度が前頭部と後頭部で約 7°C の差があったため、その分 34°C になるまでに時間がかかったと推測される。

37 分 34 秒にサーモグラフィカメラで乳児頭部熱モデルの表面温度を観察すると、表面の表示色が部分によって異なっていた。しかし、サーモグラフィカメラの表す各色の温度差は 0.5°C 以内と微小であるため、乳児頭部熱モデルの活用に問題はないと考えられる。したがって、乳児頭部熱モデルの妥当性が検証された。

6. おわりに

本研究では、空調のドラフト評価のための乳児頭部熱モデルの構築とその制御係数を明らかとした。本研究で構築した乳児頭部熱モデルは、乳児の温熱環境の不快感の把握を可能とし、快適な温熱環境の向上に貢献できると考えられる。また、大人の人体熱モデルが、建築物内部の空調設備、被験者実験が困難な温熱環境の実験などに応用されていることから、乳児頭部熱モデルも同様に応用されることが期待される。

7. 参考文献

[1] 田中俊六, 武田仁, 土屋喬雄, 寺尾道仁, 岩田利枝, 秋元孝之: 最新建築環境工学, 井上書院, pp14-15, 2020

[2] ニッシンハウス COZY 遠軽店: “聞けばためになるお家の話快適な室内環境を決める “3 つの温度差””, ニッシンハウス COZY 遠軽店, 2017-02-14, <https://www.nissinhouse.co.jp/column/342/>, (参照 2022-11-24)

[3] 横幕鍼灸院: “自律神経失調症の原因”, 全国から患者さんが来院される横幕鍼灸院, 2022-04-01, <https://www.jiritsu-shinkei.jp/14830194534891/>, (参照 2022-06-30)

[4] 山口広平: “冷え”, 厚生労働省研究班監修女性の健康推進室ヘルスケアラボ, 2021-10-12, https://w-health.jp/woman_trouble/cold/, (参照 2022-06-30)

[5] 都築和代, 飯塚幸子, 光辻佐枝子, 池田麻子, 富田純子, 栃原裕, 大中忠勝: 関東地域の住宅における乳幼児の衣住温熱環境調査, 日本家政学会誌, No. 5, pp. 429-438, 2001

[6] 都築和代, 大中忠勝, 栃原裕: 母親による選択された室温と温熱反応における季節差・年齢差について, 日本家政学会誌, Vol. 49, No. 10, pp. 1109-1117, 1998

[7] 半澤久: 人体局所のドラフト評価に関する工学的研究とその空調環境設計への応用, 国立国会図書館デジタルコレクション, 2001, 196p, <https://dl.ndl.go.jp/info:ndl.jp/pid/3182430>, (参照 2022-6-29)

[8] 堀祐祐: 不均一熱環境における快適性評価とその予測手法に関する研究, 国立国会図書館デジタルコレクション, 2000, 146p, <https://dl.ndl.go.jp/info:ndl.jp/pid/3189218> (参照 2022-6-29)

[9] 田辺新一: 住宅における温熱快適性の評価, 住宅総合研究財団研究年報, 第 23 巻, pp19-32, 1996

[10] フーダ リスティア ニルル, 松原奈穂美, 本間宏: 対流熱伝達量の後頭部とくるぶしにおける差に関する実験的研究, 日本建築学会環境系論文集, 第 574 号 pp21-28, 2003, <https://www.kem.kyoto/products/heat/thmms/>

[11] PT teknik climate comfort: “FAQ サーマルマネキン”, PT teknik climate comfort, 2022, <https://pt-teknik.dk/products/thermal-manikins/>, (参照 2022-09-22)

[12] 京都電子工業株式会社: “サーマルマネキン”, 京都電子工業株式会社, 2020, <https://www.kem.kyoto/products/heat/thmms/>, (参照 2022-09-22)

[13] サーメトリックス: “ニュートンサーマルマネキン”, サーメトリックス, 2022, <https://thermetrics.com/products/manikin/newton-thermal-manikin/>, (参照 2022-09-22)

[14] 奥村南美, 高橋恵里佳, 山口佳那子: 乳児の温熱環境評

価のための人体熱モデルの構築に関する研究, 2020, <https://www.he.sugiyama-u.ac.jp/exhibition/131e7d98a7296852368828bb180fb27d8394c9ca.pdf> (参照 2022-12-01)

[15] 蔵澄美仁, 堀越哲美, 土川忠浩, 松原斎樹: 日本人の体表面積に関する研究, 日本生気象学会雑誌, 第 31 巻, 第 1 号, pp. 5-29, 1994

[16] 蔵澄美仁, 土川忠浩, 大和義昭, 角谷孝一郎, 松原斎樹, 堀越哲美: 姿勢と人体の有効対流面積率に関する研究, 日本生気象学会雑誌, 40(1), pp. 3-13, 2003

[17] Kurazumi, Y., Tsuchikawa, T., M. Matsubara, Horikoshi, T.: Convection heat transfer area of the human body. European Journal of Applied Physiology, 93(3), pp. 73-285, 2004

[18] Kurazumi, Y., Tsuchikawa, T., Matsubara, N., Horikoshi, T.: Effect of posture on the heat transfer areas of the human body. Building and Environment, 43(10), pp. 1555-1565, 2008

[19] 蔵澄美仁, 堀越哲美, 土川忠浩, 松原斎樹: 日本人の体表面積に関する研究, 日本生気象学会雑誌, 31(1), pp. 5-29, 1994

[20] 蔵澄美仁, 土川忠浩, 角谷孝一郎, 鳥居孝行, 松原斎樹, 堀越哲美: 人体の体表面積算出式の適合性の評価. 日本生気象学会雑誌, 39(4), pp. 101-106, 2003

[21] 越智匠, 樋口寅郎: 初生児ノ體表面積並ビニ瓦斯新陳代謝正常標準値ニ就テ, 慶應醫學, 15(5), 709-725, 1935

[22] 大城千萬人, 田川恒夫: 日本乳児ノ體表面積測定成績. 兒科雑誌, 43(4), pp. 604-616, 1936

[23] 小林収, 鷲尾滋夫, 兒玉武伊知, 坂口茂, 林功: 本邦小児の體表面積について. 日本小兒科學會雑誌, 56(4), pp. 217-221, 1952

[24] 宮島暉: 日本人の体表面積に関する研究, 第 13 篇 乳児の体表面積及びその算出式, 長崎総合公衆衛生学雑誌, 9(9), pp. 484-499, 1960

[25] 藤本薫喜, 渡辺孟, 坂本淳, 湯川幸一, 森本和枝: 日本人の体表面積に関する研究 第 18 篇, 三期にまとめた算出式. 日本衛生学会誌, 23(5), pp. 43-450, 1968

[26] 子ども家庭局母子保健課: “平成 22 年乳幼児身体発育調査の概況について”. 厚生労働省, 2011, <https://www.mhlw.go.jp/file/04-Houdouhappyou-11901000-Koyoukintoujidoukateikyoku-Soumuka/kekagaiyou.pdf>, (参照 2022-11-24)