

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：14302

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24500925

研究課題名(和文) 乳児発汗シミュレータの開発 - 乳児型発汗サーマルマネキンの開発を目指して -

研究課題名(英文) Challenge in development of perspiring simulator of infant -Development of sweating thermal manikin of infant for evaluation of thermal stress in infant-

研究代表者

深沢 太香子 (Fukazawa, Takako)

京都教育大学・教育学部・准教授

研究者番号：90423574

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：乳児の温熱環境評価装置である「乳児型発汗サーマルマネキン」を開発する基盤研究として、乳児体表からの顕熱・潜熱放散を再現する発汗シミュレータの開発を試みた。作製した角質層からの水分蒸散を模擬する気相発汗模擬装置は、乳児の全身不感蒸散を再現することが確認された。温熱性発汗を模擬した液相発汗模擬装置も作製した。熱産生がほぼ一定の乳児を模擬した皮膚上には、発汗量が約40g/m²h以上になると残留する汗が観察され、体熱放散を顕熱に依存する乳児の特徴を再現することが確認された。これらより、不感蒸散と発汗を再現する乳児の発汗サーマルマネキンの構築に、本研究で開発した装置の系を応用する有用性が示された。

研究成果の概要(英文)：A simulator of infant's heat production and release has been developed, in which both perspiration and sweating can also be realized. The simulator consisted mainly of two parts; those were water supplier and simulated skin systems. Surface of the skin system was maintained at 33 °C by the same heat energy of 70 W/m² as infant's metabolic rate in rest. In the case of simulating insensible perspiration, evaporated rate from the skin system was almost equal to the given water to the one with the infant's perspiration rate of 10 g/m²h. In the case of simulating sweating, small amount of water evaporated from and the rest stayed over the skin system due to the fixed heat energy when the supplied water rate exceeded 40 g/m²h. This indicates the device represented well dependence of sensible heat transfer from the infant as mentioned in references. Thus, it can be noted that technique in the present study is available to apply for making a baby sweating thermal manikin.

研究分野：被服環境学

キーワード：乳児 体温調節 温熱環境 安全 蒸散 発汗

1. 研究開始当初の背景

人体の体温調節には、自律性と行動性の調節機能がある。自律性体温調節によって環境に適應できる温熱環境の範囲は極めて狭いので、日常生活を送る上で、空調の設定や衣服の着脱等の行動性体温調節に強く依存しているのが現状である。この行動性体温調節は、個人の温熱感覚に基づいて行われるものであるが、乳児の場合は、自ら行動性体温調節を行うことができない。それゆえ、乳児の行動性体温調節は、保護者などの大人の温熱感覚に基づいて行われている。

ところが、大人による乳児の行動性体温調節が、時として、乳児に温熱的負荷を与え、乳幼児突然死症候群や熱中症、低体温症を招く一要因となることが指摘されている [例え、1]。そこで、乳児にとって適切な行動性体温調節が行われるようになるためには、暑熱・寒冷などの様々な環境における乳児の生理的負荷を定量的に評価し、把握しなければならない。しかしながら、乳児の被験者実験への参加は、倫理上、困難な点が多い。

2. 研究の目的

したがって、乳児被験者の代替となりうる、乳児の体型および熱産生と熱放散を模擬した「乳児型発汗サーマルマネキン」が開発されれば、乳児の安全性に関する温熱環境評価に貢献するであろう。そこで、本研究では、その基盤研究として、乳児体表からの顕熱・潜熱放散を再現する発汗シミュレータを開発することとした。

3. 研究の方法

(1) 乳児体表からの放熱

乳児体表からの熱伝達特性を明確にするために、顕熱のみを再現する乳児型サーマルマネキンを用いて、放射および対流熱伝達率を評価した。測定には、当研究グループで開発したサーマルマネキンを使用した。使用に際し、当該サーマルマネキンの構造を改良して、制御性能を向上させた。

測定は、25-26 °C、50-60 %RH、気流 0.2-0.4 m/s の温熱環境下で行った。

(2) 気相発汗模擬装置の作製

人体では、表皮内角質層下にある間質液の蒸散が常時生じているが、ヒトが認識しない現象のため、不感蒸散という。この不感蒸散を再現する気相発汗模擬装置を作製した。

模擬装置の構成として、主要部を模擬皮膚部と水供給部とする構造とした。模擬皮膚部は、微細孔構造を有する金属板とヒータから成り、ヒータには乳児の熱産生量と同等の約 70 W/m² の熱が連続的に供給され [2]、同時に、模擬皮膚表面である金属板表面は、体表と同様の約 33 °C に維持されるように制御された。水供給部からは、乳児の全身不感蒸散量 [3] と同等の約 10 g/m²h の水が微細孔金属板の下表面に断続的に供給され、ヒ

ータによって、金属板の下表面もしくは内部で蒸発される仕組みとした。

模擬皮膚表面からの蒸散量および装置の重量測定を行い、気相発汗模擬装置による不感蒸散の再現性を検証することとした。

(3) 液相発汗模擬装置の作製

体温上昇が生じると、汗の蒸発による冷却効果を得るために、体表上にはエクリン腺から液相の汗が拍出される。この発汗現象と体表状での濡れ広がり蒸発を再現する液相発汗模擬装置を作製した。

液相発汗模擬装置は、先の液相発汗模擬装置と基本的に同じ構造とし、模擬皮膚部と水供給部から構成した。貫通孔をもつ多孔質金属板とヒータから成る模擬皮膚部の表面温度は、約 33 °C に制御されるとともに、ヒータへの供給熱量は、乳児の熱産生量と同等の約 70 W/m² とした [2]。水供給部から模擬皮膚へ供給する水量は、任意で設定できるように精密ポンプを使用した。液相汗と想定した水は、貫通孔を通過して多孔質金属板表面へ連続的に供給され、貫通孔から拍出後、素早く板表面を濡れ広がり、一部は蒸発し、一部は板表面上に残留汗として滞在する様子を再現できるようにした。

模擬皮膚表面からの蒸散量および装置の重量測定を行い、液相発汗模擬装置による温熱性発汗の再現性を検証することとした。模擬皮膚への供給する水量として、乳児の全身不感蒸散量以上の、15、30、40、60、80 g/m²h とした。

4. 研究成果

(1) 顕熱放散の特徴

乳児体表からの熱伝達特性について、改良したベビーサーマルマネキンにて評価した。その結果、放射熱伝達率は、全身および身体各部位において、約 5 W/m²K であった。一方、微風気流下での対流熱伝達率は、全身で約 10 W/m²K を示し、図 1 に示すとおり、身体部位によって有意に異なる値を示した。上肢や下肢における対流熱伝達率は、体幹や頭

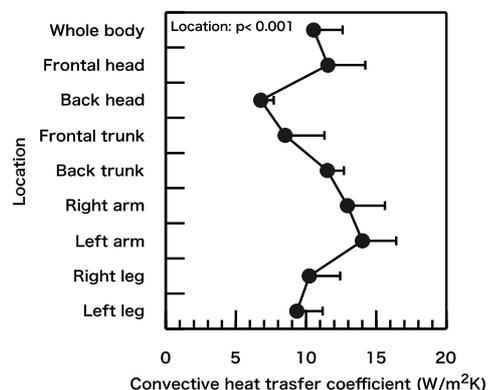


図 1 ベビーサーマルマネキンを用いた乳児体表からの対流による放熱特性

表 1 乳児と成人の体表からの対流熱伝達率

Location in the body	Convective heat transfer coefficient (W/m ² K)			
	Infant	Adult	Significance	
Whole body	10.5 ± 2.0	7.6 ± 0.1	**	
Head	10.4 ± 1.9	5.3 ± 0.1	**	
Trunk	Front	8.5 ± 2.8	5.4 ± 0.1	**
	Back	11.5 ± 1.2	6.1 ± 0.1	**
Limbs	Upper	13.5 ± 2.5	7.5 ± 0.1	**
	Lower	9.8 ± 2.0	9.3 ± 0.2	n. s

** : p < 0.01

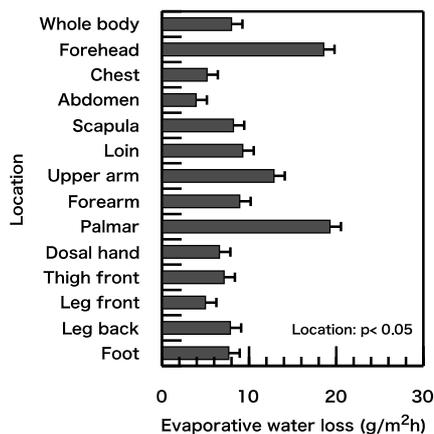


図 2 乳児体表からの不感蒸散量

部におけるそれよりも大きく、放熱しやすい部位であることが確認された。

乳児と成人における体表からの対流熱伝達率について表 1 に示す。乳児の全身および身体各部位における対流熱伝達率は、成人よりも大値を示した。暑熱環境における乳児の体温調節は、発汗による潜熱放散よりも血流による顕熱放散に依存すると考えられている [4]。サーマルメネキンを用いた本測定により、乳児は、熱産生量が大きいこと、身長が小さいという形態的特徴によって、成人と比較して、顕熱放散しやすいことが定量的に検証された。

(2) 乳児の不感蒸散と発汗挙動

文献より、乳児の体温調節に関して、特に、不感蒸散や暑熱環境における発汗挙動について調査した [例えば、3-6]。文献に基づいて作成した不感蒸散量について、図 2 に示す。乳児における全身からの不感蒸散量は、10 g/m²h 前後であり [3, 5, 6]、この量は、成人の半分以下であった。また、この不感蒸散量による潜熱は、乳児の熱産生量中、10% 程度を占めるのみであった。

成人が暑熱環境に曝露されると、曝露気温の上昇に伴い不感蒸散量は徐々に増加し、体温が上昇すると発汗を生じる。そして、体熱放散は、潜熱移動に依存することとなる [7]。他方、乳児が暑熱環境に曝露されると、気温が約 36 °C に達するまで、不感蒸散量はほぼ一定値を示す [5]。そして、体温が 37.2 °C

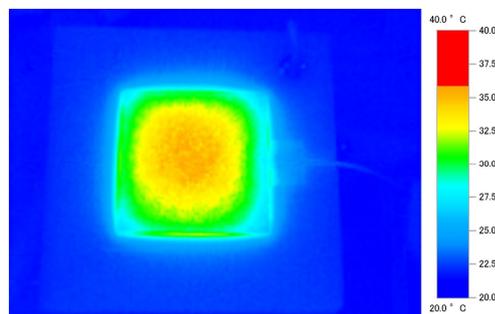


図 3 乳児の不感蒸散を再現する気相発汗模擬装置の熱画像

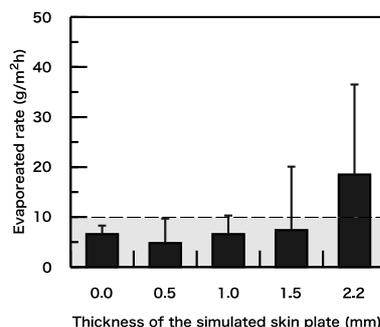


図 4 模擬皮膚部中の多孔質金属板からの蒸発量

に達すると発汗を生じるが、汗腺は未発達であることが要因で [4]、発汗量は熱産生量の 25% 程度に留まる [5]。

上述より、乳児の不感蒸散量および発汗量は少量であり、体表からの熱放散は顕熱移動に依存する特徴を有することがわかった。

(3) 不感蒸散の再現

図 3 は、作製した気相発汗模擬装置による乳児における不感蒸散の再現性を検証する測定時の熱画像である。模擬皮膚表面には、多少の温度分布がみられるものの、その表面平均温度は、設定の供給熱量にて、約 33 °C に維持された。

模擬皮膚部内に設置する微細孔金属板の模擬皮膚としての適性について、水分蒸散量より評価した結果を図 4 に示す。模擬皮膚からの蒸散量は、微細孔金属板の厚さによって異なる値を示した。具体的には、微細孔金属板の厚さが 0.5 mm の場合、模擬皮膚からの蒸散量は約 5 g/m²h で、乳児における不感蒸散量の約半分の値であった。微細孔金属板の厚さが 1.0 mm と 1.5 mm の場合、模擬皮膚からの平均蒸散量は、約 7 g/m²h であった。標準偏差を加味すると、1.0 mm の金属板採用時における蒸散量は、供給水量とほぼ同量となることがわかる。他方、微細孔金属板の厚さが 2.2 mm になると、蒸散量は約 19 g/m²h にまで著しく増加した。

上述より、乳児の不感蒸散の再現には、厚さ 1 mm の微細孔金属板が、気相発汗模擬

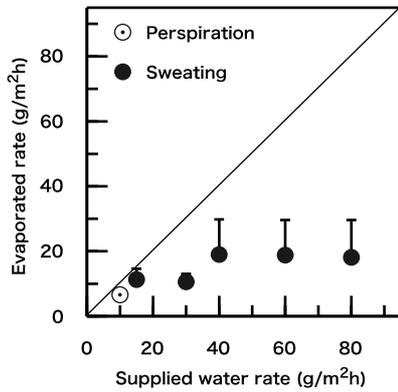


図 5 液相発汗模擬装置への供給水量に対する模擬皮膚からの蒸散量

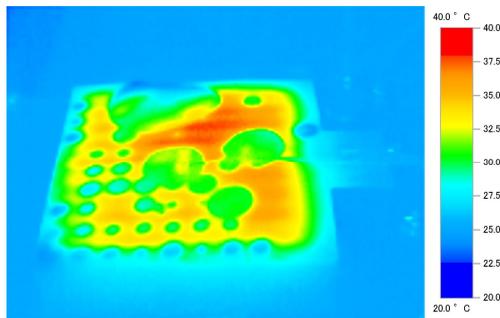


図 6 液相発汗模擬装置への供給水量条件 80 g/m²h における熱画像

装置中の模擬皮膚に適性であると判断した。

(4) 温熱性発汗の再現

液相発汗模擬装置への供給水量に対する模擬皮膚からの蒸散量について、不感蒸散時のデータと併せて、図 5 に示す。発汗量とした供給水量 5 条件中、模擬皮膚からの蒸散量と同程度を示したのは、15 g/m²h 条件時のみであった。供給水量 30 g/m²h 条件における模擬皮膚からの蒸散量は、供給水の半分程度であったものの、その表面は乾燥した状態にあり、設定した供給熱量にて約 33 °C の表面温度に維持された。一方、大量発汗を想定した供給水量が 40 g/m²h 条件以上になると、模擬皮膚からの蒸散量は約 20 g/m²h に留まり、表面上への液相水の残留が目視にて認められるようになった。そして、その残留水量は、供給水量に伴い増加した。

図 6 に示した供給水量条件 80 g/m²h 時の模擬皮膚表面の熱画像に認められるように、発汗量が多い場合には、設定した供給熱量では模擬皮膚表面温を 33 °C に維持できなくなった。このことは、活動によって熱産生を増加することのない乳児に大量発汗が生じた場合、残留汗による体表の濡れにより顕熱放散が助長されるため、身体が冷却されやすくなると考えられる。

本検証実験において、液相発汗模擬装置への供給熱量 (q_{total}) は、乳児熱産生量と同等に設定した。この熱量中に占める、模擬皮膚

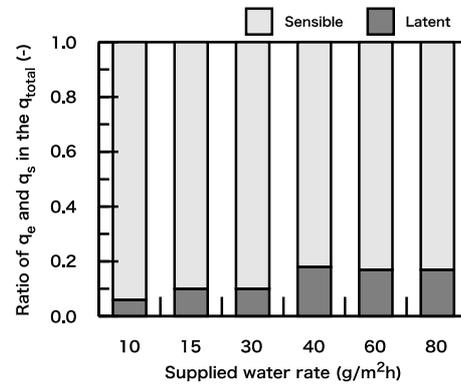


図 7 乳児の発汗挙動を模擬した気相もしくは液相発汗模擬装置からの顕熱・潜熱移動比

表面からの顕熱移動量 (q_s) と潜熱移動量 (q_e) の比を図 7 に示す。温熱的中性域下の場合、成人の不感蒸散による潜熱移動量は体熱放散中の 30 % 程度で、顕熱移動量は 70 % 程度となる。暑熱曝露や活動によって成人が発汗した場合、体熱放散中に占める潜熱移動量の比は著しく増加して、体熱放散の殆どを潜熱移動が占めることとなる [7]。一方、乳児の不感蒸散による潜熱移動量は、図 7 にあるとおり、供給熱量中の僅か 10 % 程度となり、顕熱移動量が 90 % 程度を占める。また、本研究で開発した液相発汗模擬装置にて大量な発汗状態を再現した際、供給熱量中に占める蒸発による潜熱移動量は、僅か 20 % 程度に留まった。この値は、乳児に温熱性発汗が生じてても、体表からの潜熱移動量は体熱放散中の 23 % までとなる報告と一致する [5]。

これらより、本研究で作製した液相発汗模擬装置は、発汗時における乳児の体表からの放熱特性を再現していることが確認された。

上述のとおり、本研究で開発した気相発汗と液相発汗模擬装置の有用性が得られた。そこで、今後の課題として、本研究にて開発した装置の再現性の精度を改善した上で、装置の系を、不感蒸散と発汗を再現する乳児型発汗サーマルマネキン の構築に応用する。

< 引用文献 >

- 1 藤田 利治: わが国における乳児の乳幼児突然死症候群 (SIDS) および窒息死の概況, 母子保健情報, 53, 2006, 25-29
- 2 古賀 俊策, 樽木 暢雄, 横山 真太郎: 人間の生理的負担と疲労, 佐藤 方彦編著 人間工学基準数値数式便覧, 技報堂, 1992, 197-212
- 3 原 裕英: 皮膚からの水分蒸散量測定, 日本化粧品学会誌, 6, 1982, 113-121
- 4 平田 耕造, 井上 芳光, 近藤 徳彦 編著: 体温 運動時の体温調節システムとそれを修飾する要因, ナップ, 2002, 180-186
- 5 E. N. Hey and G. Kats: Evaporative water loss in the new-born baby, J. Physiol., 200, 1969, 605-619

- 6 K. G. Foster, E. N. Het and G. Kats: The response of the sweat glands of the new-born baby to thermal stimuli and to intradermal acetylcholine, *J. Physiol.*, 203, 1969, 13-29
- 7 丸田 直美:産熱と放熱,日本家政学会被服衛生学部会編著 アパレルと健康 -基礎から進化する衣服まで-, 井上書院, 2012, 24-27

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

- (1) 繊維製品消費科学会快適性・健康研究委員会 深沢 太香子:ヒトをはかる 16 話(その 8) 汗をはかる 2 ぬれ率をはかる 繊維製品消費科学会誌, 査読有, 55 巻, 2014, 659
- (2) 繊維製品消費科学会快適性・健康研究委員会 深沢 太香子:ヒトをはかる 16 話(その 12)運動機能をはかる 4 深部体温をはかる, 繊維製品消費科学会誌, 査読有, 55 巻, 2014, 803
- (3) 深沢 太香子:低温・低圧環境における体温調節と衣服 -高所で着用する衣服-, 繊維機械学会誌, 60 巻, 2015, 印刷中

〔学会発表〕(計 28 件, うち招待講演 10 件)

- (1) 深沢 太香子:低温・低圧環境におけるヒトの生理・心理反応, 繊維製品消費科学会第 47 回快適性を考えるシンポジウム, 2014 年 4 月 25 日, キャンパスプラザ京都(京都府・京都市)
- (2) 深沢 太香子:若年女子における熱産生量と温熱的快適性評価, 日本家政学会第 66 回大会, 2014 年 5 月 23-25 日, 北九州市国際展示場(福岡県・北九州市)
- (3) 深沢 太香子, 柴田 ゆい乃, 栃原裕:乳児用衣服の熱抵抗 -単品衣服と衣服アンサンブルの熱抵抗-, 日本繊維製品消費科学会 2014 年度年次大会, 2014 年 6 月 28・29 日, 京都繊維工芸大学(京都府・京都市)
- (4) 杉 綾希子, 谷 明日香, 深沢 太香子:若年男女における温度感受性の違い, 日本繊維製品消費科学会 2014 年度年次大会, 2014 年 6 月 28・29 日, 京都繊維工芸大学(京都府・京都市)
- (5) 杉 綾希子, 谷 明日香, 深沢 太香子:高齢者と若年者における温度識別能と温冷感受性,(一社)日本家政学会被服衛生学部会第 33 回被服衛生学セミナー, 2014 年 8 月 23・24 日, 高崎健康福祉大学(群馬県・高崎市)
- (6) Takako Fukazawa, Yuino Shibata, Sachiyo Ikeda, Keiko Watanabe, Yutaka Tochihara: Thermal resistance of clothing and ensembles for infant measured using a baby

thermal manikin, The 10th International Meeting for Manikins and Modeling, 2014 年 9 月 7 日-9 日, Tampere Hall (Tampere, Finland)

- (7) Takako Fukazawa, Yuino Shibata, Sachiyo Ikeda, Keiko Watanabe, Yutaka Tochihara: Measurement of thermal resistances of infant's clothing and ensembles by means of a baby thermal manikin, International Symposium on Fiber Science and Technology 2014, 2014 年 9 月 28 日-10 月 1 日, ビックサイト東京ファッションタウンホール(東京都・江東区)
- (8) 杉 綾希子, 谷 明日香, 深沢 太香子:高齢者の温・冷感受性,(一社)日本家政学会関西支部第 36 回研究発表会, 2014 年 10 月 25 日, 京都聖母女学院短期大学(京都府・京都市)
- (9) 深沢 太香子:ヒトをはかる 16 話 その 8 汗をはかる ぬれ率をはかる, 繊維製品消費科学会第 48 回快適性を考えるシンポジウム, 2014 年 10 月 31 日, 京都教育大学(京都府・京都市)
- (10) 深沢 太香子:発表標題:ヒトをはかる 16 話 その 12 運動機能をはかる 深部体温をはかる 繊維製品消費科学会第 48 回快適性を考えるシンポジウム, 2014 年 10 月 31 日, 京都教育大学(京都府・京都市)
- (11) 深沢 太香子:男女の温熱的快適性, 公益社団法人自動車技術会シンポジウム No. 04-14, 2014 年 11 月 14 日, 研究社英語研修センター(東京都・新宿区)
- (12) 深沢 太香子:低圧・低温環境における体温調節と衣服,(一社)日本繊維機械学会第 21 回秋季セミナー, 2014 年 11 月 20・21 日, 大阪大学中之島センター(大阪府・大阪市)
- (13) 深沢 太香子, 邱 艶暎:日本人若年者における温熱的快適性評価, 人間生活環境系学会第 38 回人間生活環境系シンポジウム, 2014 年 12 月 6・7 日, 長崎県立大学(長崎県・西彼杵郡)
- (14) 深沢 太香子:日本人および白人若年男性における温熱的快適性の差異, 日本家政学会第 65 回大会, 2013 年 5 月 17-19 日, 昭和女子大学(東京都・世田谷区)
- (15) 深沢 太香子, 栃原 裕:日本人乳児衣服の熱抵抗, 日本繊維製品消費科学 2013 年度年次大会, 2013 年 6 月 22・23 日, 椋山女学園大学(愛知県・名古屋市)
- (16) 柴田 ゆい乃, 深沢 太香子, 栃原裕:乳児型サーマルマネキンを用いた乳児用衣服の熱抵抗測定, 日本家政学会被服衛生学部会第 32 回被服衛生学セミナー, 2013 年 8 月 24・25 日, アクトシティ浜松(静岡県・浜松市)
- (17) 柴田 ゆい乃, 深沢 太香子:乳児用衣

- 服の熱抵抗, 2013 年度第 35 回 (通算 91 回) 日本家政学会関西支部研究発表会, 2013 年 10 月 12 日, 大阪青山大学 (大阪府・箕面市)
- (18) 深沢 太香子: サーマルマネキンによる温熱環境評価 - 着衣の観点から -, 公益社団法人自動車技術会 2013 年度第 9 回車室内環境技術部門委員会, 2013 年 9 月 6 日, 京都教育大学 (京都府・京都市)
- (19) 深沢 太香子, 柴田 ゆい乃, 柝原 裕: 乳児用単品衣服と衣服アンサンブルの熱抵抗, 人間生活-環境系学会 第 37 回人間生活-環境系シンポジウム, 2013 年 11 月 30 日-12 月 1 日, 神戸大学統合研究拠点 (兵庫県・神戸市)
- (20) 深沢 太香子: 健康の条件, 日本家政学会被服衛生学部会科研費研究成果公開講座 衣服と健康の科学, 最前線 - ここまでできる, 衣服の力を考える -, 2013 年 3 月 16 日, 兵庫県民会館 (兵庫県・神戸市)
- (21) Takako Fukazawa, Yutaka Tochihara: The thermal manikin: a useful and effective device for evaluating human thermal environments, International Symposium on "Ergonomics and Physiological Anthropology in Thermal Environments", 2013 年 3 月 23 日, 九州大学 (福岡県・福岡市)
- (22) 深沢 太香子: 若年男子と若年女子における温熱的快適感閾値の違い, 日本家政学会第 64 回大会, 2012 年 5 月 11-13 日, 大阪市立大学 (大阪府・大阪市)
- (23) Takako Fukazawa, Yutaka Tochihara: Thermal resistance of infant's clothing ensembles measured using a baby thermal manikin, The 9th International Meeting for Manikins and Modeling, 2012 年 8 月 21-24 日, 早稲田大学 (東京都・新宿区)
- (24) 深沢 太香子, 柝原 裕: 九州大学大学院 芸術工学研究院におけるサーマルマネキン研究史, 建築学会 サーマルマネキン・人体 WG, 2012 年 10 月 2 日, 九州大学 (福岡県・福岡市)
- (25) 深沢 太香子, 邱 艶暁: 身体活動量と温熱的快適性評価, 2012 年度第 34 回 (通算 90 回) 日本家政学会関西支部研究発表会, 2012 年 10 月 13 日, 奈良女子大学 (奈良県・奈良市)
- (26) 深沢 太香子: 若年日本人男性と若年白人男性における温熱的快適性, 日本衣服学会第 64 回 (平成 24 年度) 年次大会, 2012 年 11 月 10 日, 京都華頂大学 (京都府・京都市)
- (27) 深沢 太香子, George Havenith: 温暖環境下での運動時における日本人および白人男性の生理反応と温熱的快適性,

- 人間生活環境系学会 第 36 回 人間生活環境系シンポジウム, 2012 年 12 月 1・2 日, 大同大学 (愛知県・名古屋市)
- (28) 深沢 太香子: 温熱的快適性における性差・人種差, 公益社団法人自動車技術会 2012 年度第 5 回車室内環境技術部門委員会, 2012 年 12 月 7 日, 五番町センタービル (東京都・新宿区)

〔図書〕(計 2 件)

- (1) 日本生理人類学会 編著(深沢 太香子, 柝原 裕, 全 129 名), 丸善出版, 人間科学の百科事典, 2015, 782 (262-263, 394-395)
- (2) 一般社団法人 日本家政学会 編著(深沢 太香子, 柝原 裕, 全 124 名), 丸善出版, 衣服の百科事典, 2015, 650 (2-5, 374-375)

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
深沢 太香子 (FUKAZAWA, Takako)
京都教育大学・教育学部・准教授
研究者番号: 90423574
- (2) 研究分担者
柝原 裕 (TOCHIHARA, Yutaka)
九州大学・芸術工学研究科 (研究院)・名誉教授
研究者番号: 50095907
- (3) 研究協力者
Kalev Kuklane (KUKLANE, Kalev)
Lund University (スウェーデン)・Organisation Ergonomics and Aerosol Technology・准教授