

平成30年6月22日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2017

課題番号：25280101

研究課題名(和文) 温熱的快適性の形成メカニズムの解析と衣服内環境評価への応用

研究課題名(英文) Clarifying mechanisms involved in thermal pleasantness/unpleasantness and the application for evaluation of the inside environment of clothes

研究代表者

永島 計 (Nagashima, Kei)

早稲田大学・人間科学学術院・教授

研究者番号：40275194

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)： 温熱的快不快感を実験的に再現する方法開発、 を脳機能画像装置内で再現する方法開発と脳機能画像採取。温度分別感覚と温熱的快不快感は別の脳領域で処理されるという仮説検証。 運動や脱水時に見られる温熱不快感の変容のメカニズムを深部体温、皮膚温度の変化から解明することを目指した。 については体表の部分的な温度差を、水循環スーツ着用による体表皮膚温の上昇と下降と局所皮膚温刺激と例刺激の組み合わせによって構築ことで再現可能とした。 局所温度刺激と での実験の組み合わせにより、異なる脳部位が温度受容(分別感覚と快不快感)に関わっていた。 温度パラメータ以外の温熱的快不快感への寄与を明らかにした。

研究成果の概要(英文)： Development of a method to experimentally reproduce thermal discomfort, Development of a method to reproduce in the brain function imaging device (fMRI) and obtain brain function image. Hypothesis verification that temperature sensation sensation and thermal discomfort feeling are processed in different brain regions. Eluciation of the mechanism of transformation of thermal discomfort seen during exercise and dehydration from the changes in deep body temperature and skin temperature. For , regional temperature difference of the body surface can be reproduced by constructing it by a combination of rise and fall of body surface skin temperature with water perfusion suit and local skin temperature stimulation. Different brain regions were involved in temperature perception (discriminative and hedonic components). Possible contribution to the thermal discomfort feeling other than the temperature parameter per se was clarified.

研究分野：環境生理学

キーワード：脳機能画像 浸透圧 温度感覚 脱水 皮膚温度 体温 運動 温熱負荷

## 1. 研究開始当初の背景

### A. 衣服と温熱的快適感

ヒトは2種類の温熱感覚をもっている。ひとつは温度の分別感覚であり、もう一つは温度入力に対する温熱的快・不快感である。一般的に前者は“熱い”、“冷たい”と表現され、後者は“暖かい”、“涼しい”、“暑い”、“寒い”等の言葉で表現される。温熱的快・不快感は、皮膚表面からの温度刺激(温める、冷やす)が、体温維持にとって好ましいものか否かで決定されると考えられている。

### B. 温熱感覚としての快適性

Cabanac (1971, 1979), Mower (1976), Attia (1984)らは、Aに述べた2種類の温熱感覚が全く独立したものであると報告している。また、体表の“熱い”や“冷たい”感覚は、深部体温(脳温)に影響を受けない絶対的な感覚である。一方、温熱的快・不快感は生存にとって有利な環境を探索し、不利な環境から逃避する行動性体温調節のモチベーションとなっている(Schladerら, 2011)。この為、温熱的快・不快感は深部体温に大きく影響を受け、例えば高体温時には冷たい皮膚刺激を我々は、好ましく感じる。

温熱的快適性については、心理学的な手法を用いた主観評価が主に用いられている。ISOやASHRAEの出している国際的基準では、温熱的快適感を“condition of mind(心の状態)”や“assessed by subjective evaluation(客観的に評価されるもの)”と定義されており、きわめて個体差の大きい、曖昧な感覚であると考えられる。申請者も心理学的な評価方法の一つであるVisual Analogue Scale(VAS)を用いて研究をおこなっているが、個体内の快適感の変化を評価するにはVASは有効であるが、個体間の違いを評価するには大きな問題をもっているといわざるを得ない。この為、定量的な評価方法の開発が必要である。

### C. 温熱的快適性の定量的評価と脳科学

筆者らは、世界で初めて機能的核磁気共鳴装置(fMRI)を用いた温熱的快・不快感の脳の責任領域の探索を行っている(彼末ら, 2002)。同実験では全身への温熱刺激に伴い生じる不快感と両側の扁桃体の賦活が相関することを報告したが、温熱的な刺激時間が長く、手技的な問題を多く残していた。最近の研究では、手の局所加温による温かさ(Rollsら, 2008)、全身の冷却による不快感(Farrellら, 2011)が帯状回前部の脳血流とよく相関することがfMRIおよびPositron Emission Tomography(PET)で報告されている。これらの実験結果は温熱しかし、これらの実験手法が定量的に温熱的快・不快感を評価する方法となり得るかは明らかではない。

## 2. 研究の目的

研究のゴールは衣服が与える温熱的快適性が衣服内環境によって決定されるのか否かを検証すること、温熱的快適性の評価を脳の機能的画像解析を用いて定量的に行う可能性を探索することであった。Fangerらは、温度、湿度、衣服の温熱的抵抗などの数値をもとに温熱的快適性の予測式を提唱しており、これを下にASRAEは快適性もたらず詳細な環境基準を作っている。この基準の問題はヒトの直接的な外部環境ともいえる衣服内環境が考慮されていないことである。原田ら(1982)は、衣服内環境と快適感の関係を作成しているが、詳細な実験方法は明らかにされておらず検証が必要であり、これを目指した。

Mower(1976)の実験では、深部体温が変動した際、局所(手部)温度刺激に対する分別的温度感覚は変化せず、温熱的快・不快感のみ変動すると報告している。ところが上に示したRolls, Farrellらの実験では、皮膚表面の温度刺激をおこなった際の温熱感の評価にとどまっている。温熱的快・不快感を真に評価するには、深部体温が変動した際の温度感覚を評価する必要がある。研究では、全身加温により皮膚表面温度を上昇させ、その

際、手部を局所加温・冷却を行い。温熱感(分別的温度感覚、温熱的快・不快感)を評価する。同時に近赤外光分光法(NIRS)もしくはfMRIを用いて活動する脳部位、および神経ネットワークを解析した。

### 3. 研究の方法

#### A. 温熱的快適感と修飾因子

実験では温熱的快・不快感の予想式が衣服内環境にも合致するか否かを検証する。さらに脱水や運動習慣などの宿主側の因子が温熱的快不快感に与える影響も検証した。

方法 男女の若年健康成人を対象とした。人工気候室で3種類の湿度環境(40%, 60%, 80%)で段階的な寒冷もしくは暑熱負荷を行った。また対象を運動鍛錬者、非鍛錬者に分けて温度感覚の違いを解析した。

測定項目: 食道温、鼓膜温、皮膚温、皮膚血流量(レーザードップラー法)、発汗量、皮膚熱流量、衣服内温度・湿度、温熱感覚(温度分別感覚(温度がどれだけ上がったか、下がったか)、温熱的快・不快感: Visual Analogue Scale)

#### B. 2種類の温熱感覚の独立性の再検証と接触時の温熱感覚の評価

Cabanac (1971, 1979), Mower (1976)らは温度分別感覚と温熱的快・不快感の独立性を報告している。しかしながら、これらの実験の問題点は温度分別感覚を実際の温度として報告されてはならず、“熱い”・“冷たい”という相対評価で行っていることである。実験では温度分別感覚を実際の温度の値で申告させた。

方法 (i)男女12名を対象とする。Water Perfusion Suits (Bregelmann, 1977)を購入のうえ、水流ポンプを用いて皮膚温を定温(20°C, 24°C, 28°C, 32°C, 36°C, 40°C, 44°C, 48°C)で固定する。この際、各々の全身皮膚温において、新たに開発する温度分解能、時間分解能の高いペルチエ素子で手掌も

しくは胸部体幹を

10°C, 20°C, 30°C, 40°C, 50°Cで局所冷却もしくは加温し、温度・温熱的快・不快感の申告をさせる。最後に被験者にペルチエ素子の温度コントローラーを持たせ最も快適感が得られる温度を選択させるとともに、その温度を申告させた。(ii)同様な皮膚刺激を行い、木、プラスチック、衣服素材を触れさせ、それらの温度・温熱的快・不快感の申告をさせた。

測定項目: 鼓膜温、皮膚温、手掌熱流量(新規購入予定の熱流量センサーを用いる)、温熱感覚(温度分別感覚(温度として申告)、温熱的快・不快感: Visual Analogue Scale) 解析方法: 温度で申告させた温度分別感と温熱的快・不快感との関係を求めた。

これらの研究をもとに機能的画像解析装置を用いて行う。装置の適性から現在、NIRSとfMRIの2つの方法で行った。

測定項目: 鼓膜温、皮膚温、皮膚血流量(レーザードップラー法)、発汗量、皮膚熱流量(新規購入予定の熱流量センサーを用いる)、衣服内温度・湿度(着衣時、新規購入予定の熱流量センサーを用いる)、温熱感覚(温度分別感覚(温度がどれだけ上がったか、下がったか)、温熱的快・不快感: Visual Analogue Scale), NIRS

#### C. 接触時の温熱感覚のfMRIを用いた評価

方法 (i)男女12名を対象とする。fMRI装置内でBと同様の実験を行う。

測定項目: 鼓膜温、皮膚温、温熱感覚(温度分別感覚(温度として申告)、温熱的快・不快感: Visual Analogue Scale) fMRIによるBlood Oxygenation Level Dependence(BOLD)効果の計測

解析方法: 温度で申告させた温度分別感と温熱的快・不快感との関係を求める。両者とBOLDとの相関を探索し、温度感覚、温熱的快・不快感にかかわる責任領域のマッピング、信号強度を実際の主観に相関が得られるか

を探索した。

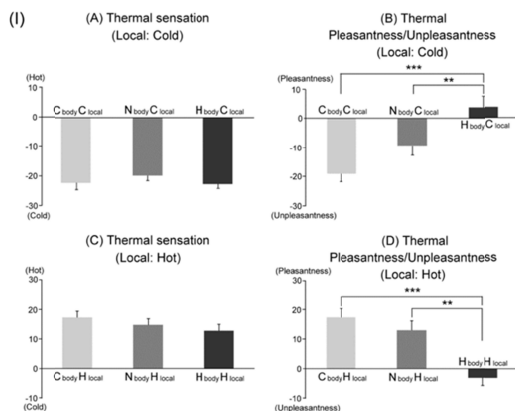
#### 4. 研究成果

##### A. 温熱的快適感と修飾因子

ここでは運動鍛錬者と非鍛錬者の温度感覚の差を解析した研究結果を提示する。

通常運動習慣のない若年男性 (SED) および持続的運動を行なっている健常な若年男性に 0.9% (生理食塩水 [NS]) または 3% NaCl (高張食塩水 [HS]) を 120 分間注入した。20 分間の注入後、温水灌流スーツ温度 (33、36 および 39) が徐々に増加することにより、全身の皮膚への表面熱刺激を負荷した上で (食道温度が 0.5~0.6 上昇) 下肢を 34.5 および 42 の水浴にそれぞれ浸水させた。温度感覚および快適性は、各熱条件下で評価した。血漿浸透圧は、HS 試験で約 10 mosmL / kg · H<sub>2</sub>O 増加した。軽度の温度負荷状態では、SED および TR 群の両方において、NS 試験よりも HS における汗の分泌量および皮膚血管コンダクタンスの増加が低かった ( $p < 0.05$ )。SED 群では、温度負荷状態における温冷感、NS 試験でよりも HS 試験でより低かった ( $p < 0.05$ )。TR 群における試験間に有意差はなかった。これらの結果は、高浸透圧が熱による感覚を減弱させ、運動訓練が減弱を排除することを示している可能性が示唆された。

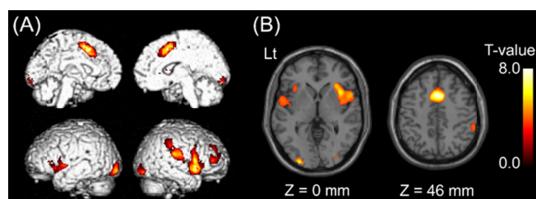
##### B. 2 種類の温熱感覚の独立性の再検証と接触時の温熱感覚の評価



上の図は全身 (body で示している) および局所 (local で示している) の温度条件 (C は

寒冷、N は平温、H は温熱) での感覚 (thermal sensation 左)、快適感 (thermal pleasantness/unpleasantness) を示している。全身の温度条件にかかわらず、局所の温度感覚に差はなかった。一方、局所の快適性は、全身の温度条件で変化しているのが観察された。

##### C. 接触時の温熱感覚の fMRI を用いた評価



fMRI で B の実験を再現した。

上の図は、すべての温度刺激条件で共通に活動する脳領域を示している。一方、刺激の違いによって明らかな、活動する脳領域の差は認められなかった。今回の実験では温度刺激、感覚に特異的な脳活動部位の違いは認められなかったが、温度感覚と温熱的快不快感の責任領域の違いが示唆されており、現在解析、論文投稿の作業中にある。

#### 5. 主な発表論文等

(雑誌論文) (計 8 件)

M. Matsuda-Nakamura and K. Nagashima, Protection of the brain against heat damage The Journal of Physical Fitness and Sports Medicine 3:217-221, 2014, DOI: 10.7600/jpfs.3.217

永島計、高体温症、低体温症の病態生理小児内科 46: 310-314, 2014

永島計、暑熱適応における恒常性の維持と破綻体育の科学 29:96-99, 2014

Ken Tokizawa, Mayumi Matsuda-Nakamura, Yuki Uchida, Cheng-Hsien Lin, Kei

Nagashima, Influence of osmotic stress on thermal perception and thermoregulation in heat is different between sedentary and trained men, *Physiology & Behavior* 161: 66-73, 2016,  
10.1016/j.physbeh.2016.04.018

Kei Nagashima, Thermal information from the skin: the signal processing and the role in behavioral thermoregulation, *Temperature*, 2:3, 334-335, 2015,  
10.1080/23328940.2015.1053597

Kei Nagashima, Thermoregulation and menstrual cycle, *Temperature*, 2:3, 320-321, 2015,  
10.1080/23328940.2015.1066

Marui S, Misawa A, Tanaka Y, Nagashima K. Assessment of axillary temperature for the evaluation of normal body temperature of healthy young adults at rest in a thermoneutral environment. *J Physiol Anthropol*. 2017 Feb 22;36(1):18.  
doi:10.1186/s40101-017-0133-y.

Fujii N, Aoki-Murakami E, Tsuji B, Kenny GP, Nagashima K, Kondo N, Nishiyasu T. Body temperature and cold sensation during and following exercise under temperate room conditions in cold-sensitive young trained females. *Physiol Rep*. 2017 Nov;5(20). pii: e13465. doi: 10.14814/phy2.13465.

内田有希, 永島計, 森本恵子. 新たな衣服内温度計による女性の就寝中の衣類内温

度計測の試み: ケースレポート. 人間科学研究 第30巻1号(2月):15-18, 2017

〔学会発表〕(計12件)  
松田真由美、和田 哲志、丸井朱里、佐藤暢夫、永島計 頭頸部冷却が深部体温に及ぼす影響第52回日本生気象学会大会2013年11月01日~2013年11月02日鳥取県米子市

Mayumi Matsuda, Satoshi Wada, Shuri Marui, Nobuo Sato, Kei Nagashima, The effect of the head or neck cooling on body core temperature and thermal pleasantness in humans, 第91回日本生理学会大会, 2014年03月16日~2014年3月18日, 鹿児島市

佐藤暢夫、丸井朱里、松田真由美、尾崎眞、永島計, 非活動期の体温のウルトラディアンリズムと睡眠覚醒リズムの同期とその生理学的意義平成25年度温熱生理研究会2013年09月05日~2013年09月06日愛知県岡崎市

相澤優香、丸井朱里、松田真由美、永島計, NIRSを用いた温度感覚の評価NIRSを用いた温度感覚の評価, 2013年11月01日~2013年11月01日, 鳥取県米子市

相澤優香、丸井朱里、松田真由美、永島計, NIRSを用いた温度感覚の評価, 第9回環境生理学プレングレス, 2014年03月15日~2014年03月15日, 鹿児島市

相澤優香、永島計, NIRSを用いた温熱的快適感の評価, 第53回 日本生気象学会大会, 2014年10月25日, 横浜

永島計, 温度受容の脳内メカニズムの解析, 日本神経科学会, 2016年07月22日, 横浜

永島計, 相澤優香, 原田宗子, 中田大貴, 綱川

みずき 定藤規弘温度感覚に関わる脳部位の  
探索日本生理学会 2016年03月24日札幌

永島計, 相澤優香, 原田宗子, 中田大貴, 綱川  
みずき 定藤規弘, 脳機能画像法による温熱  
感覚の評価, 温熱生理研究会, 2015年08月  
28日, 岡崎

相澤優香 原田宗子, 中田大貴, 綱川みずき,  
定藤規弘, 永島計, fMRI を用いた温熱的快適  
性に関わる脳活動の評価, 日本生気象学会,  
2015年11月06日, 名古屋

Kei Nagashima, Brain areas involved in  
thermal perception: where we sense, feel,  
and evaluate thermal stimulus?, PPTR2016,  
2016年11月15日, Ljubljana

Kei Nagashima, Brain areas involved in  
thermal perception: where we sense, feel,  
and evaluate thermal stimulus?, 日本生理  
学会, 2018年3月28日, 高松

〔図書〕(計1件)

Kei Nagashima, Ken Tokizawa, Shuri Marui,  
Yuki Uchida, Circadian body temperature  
rhythm and the interaction with energy  
state, In Homeostasis, 2018 (in press),  
ISBN 978-953-51-6117-2

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

btfl.jp/wplab.jp/

6. 研究組織

1) 研究代表者

永島 計 (Nagashima, Kei)

早稲田大学 人間科学学術院 教授

研究者番号: 40275195

(2) 研究分担者

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

時澤 健 (Tokizawa, Ken)  
独立行政法人労働安全衛生総合研究所 研  
究員  
研究者番号: 00454083

中田大貴 (Nakata, Daiki)  
奈良女子大学・生活環境系 准教授  
研究者番号: 40571732

国里愛彦 (Kunisato, Yoshihiko)  
専修大学・人間科学部 講師  
研究者番号: 30613856

守口善也 (Moriguchi, Yoshiya)  
独立行政法人国立精神・神経医療研究センタ  
ー 技術員  
研究者番号: 40392477

研究員

研究者番号: 00454083

(3) 研究協力者

丸井朱里 (Marui, Shuri)

早稲田大学 人間科学学術院 博士後期  
課程

相澤優香 (Aizawa, Yuka)

早稲田大学 人間科学学術院 修士課程