

令和 2 年 6 月 7 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03529

研究課題名（和文）高度生体信号の同時計測による温冷感・快適感の客観的評価と簡易計測システムの開発

研究課題名（英文）Objectively evaluating warm/cold and comfortable feelings by simultaneous measurement of advanced biosignals and developing the simplified measurement system

研究代表者

吉田 好邦 (Yoshida, Yoshikuni)

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・教授

研究者番号：30302756

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 8,600,000円

研究成果の概要（和文）：被験者に温冷刺激を与えたときの、脳血流中の酸素化ヘモグロビン濃度ならびに心拍波形を計測した。温感領域においては昇温につれてストレス指標であるLF/HF比が上昇し、酸素化ヘモグロビン濃度変化が大きくなる一方で、冷感領域においては降温につれてLF/HF比が上昇し、酸素化ヘモグロビン濃度変化が小さくなる傾向が明らかになり、生体信号による温冷感抽出のシステム化に道を開くための重要な知見を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

人間の温冷感や快適感は一々それぞれの主観的なものととらえられている。一方で、これらを客観的に計測できれば、空調の自動制御や熱中症リスクの高い人の判別に応用できるなどの様々な社会的な意義があると考えられる。また、温熱刺激に対する心拍波形の反応をLF/HF比によって被験者実験を通して評価したり、脳血流中の酸素化ヘモグロビン濃度への影響を多数の被験者実験を通して検証した研究は過去にほとんどなく、学術的な意義も大きいといえる。

研究成果の概要（英文）：We measured oxy-hemoglobin concentration in brain blood flow and waveform of the human heartbeat when a subject was stimulated thermally. In the range of warm feeling temperature, LF/HF value, known as a stress index, increased and oxy-hemoglobin concentration also increased as the increase of room temperature. In the range of cold feeling temperature, on the other hand, LF/HF value increased and oxy-hemoglobin concentration decreased as the drop of room temperature. This important knowledge can be applied for developing the system to identify warm/cool feelings from human biosignals.

研究分野：エネルギーシステム工学

キーワード：NIRS 酸素化ヘモグロビン濃度 心拍波形 LF/HF 温冷感 快適感

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

家庭のエネルギー消費量のうち、人間の快適性を維持するための空調、給湯、照明の需要は全体の 7 割を占める。特に人間の温熱快適性の制約を伴う空調エネルギーは単純に省エネルギーを進めればよいものでもない。空間の画一的な空調制御から、人のタスク空間をターゲットにした空調への移行が進み始めているが、個人差の大きい温冷感・快適感をより考慮した形での普及が望まれる。省エネルギーに寄与する以外でも、熱中症の予防に有効な空調についても、人によっては温熱感覚が乏しいがために熱中症リスクが高くなる場合もあり、健康面でも個人差に配慮した空調が必要である。

従来、人間の温冷感・快適感に関する研究は多くの研究の蓄積があり、多くの研究で、さまざまな条件で保たれた環境実験室内において、温熱環境の 6 要素(温熱環境要素【気温、湿度、放射、風速】と、人の【着衣量と活動量】)に代表される快適性の指標を計測するとともに、温冷感・快適感について評価(スコア)を申告してもらう形式をとっている。一方で、申告された温冷感・快適感は主観的な評価が避けられない。このような主観的指標は、個人の評価基準の相違、離散的な申告スコア、さらに連続的測定が不可能という欠点を有する。例えば建物の断熱化は、複数の被験者によって平均的な温冷感・快適感の評価が適用可能だが、服装などによる人体表面での断熱は個人の温冷感・快適感によって評価しなければならない。また体温や皮膚濡れ面率のような計測値は、快適さや不快さとの関連が示唆されているが、快適感そのものではない。多くの人を対象とする全室空調の場合、多くの人の主観的快適感の平均値を採用すれば曖昧さや離散値の問題が解消されるが、個人空調の場合、主観的快適感での評価では問題が生じる。

客観的な生体信号と温冷感・快適感の関係では、脳活動について fMRI (functional magnetic resonance imaging; 磁気共鳴機能画像法) による研究蓄積があるがⁱ⁾、計測装置の被験者の拘束性が大きいことが課題として避けられない。同じく脳活動について、拘束性の小さい NIRS (Near-Infrared Spectroscopy; 近赤外分光分析法) による温冷感・快適感との関係は、未だ研究蓄積が少なく、局所温冷感の検証にとどまっているⁱⁱ⁾。心拍波形については従来心理的なストレスとの関係に着目されてきたⁱⁱⁱ⁾が、温冷感との関連についても着目されつつある。申請者らは科研費・基盤研究 B(2014-2016)において、NIRS による局所温冷感の計測を世界に先駆けて行ってきた。その結果、局所冷感については賦活する脳の部位の特定と脳活動の相関を見出すことができていた。一方、局所温感や全身温冷感、現在のところ統計的に有意な相関を見出すに至っていない。他方、今回共同で行う研究分担者は、心拍波形と温冷感の関連についての先駆的研究を開始しており、これらを組み合わせることにより温冷感・快適感について、より客観的かつ頑健な評価が可能になると考え、本研究の着想に至った。

2. 研究の目的

本研究では温冷感・快適感との関係をもつ高度生体信号を見出すことが目標となる。ここで高度生体信号は比較的専門性の高い機器で計測することを要する生体信号を指す。脳波はそのひとつで簡易な計測機器も開発されているものの、学術的な解析には医学的な専門的知見を要し、温冷感・快適感の関係を学術的な妥当性をもって明らかにすることは容易ではない。そこで本研究では基盤研究 B(2014-2016)に引き続き、NIRS による脳血流中の酸素化ヘモグロビン濃度(Oxy-Hb)変化と温冷感・快適感との関係に着目する。基盤研究 B(2014-2016)の中で把握したデータの特徴や解析手法を活用し、局所温感や全身温冷感についても NIRS による計測結果との関連を明らかにする。

同時に心理ストレスの計測に実績があり、温冷感についても近年その関連が指摘されている心拍波形の計測を行う。具体的には心拍波形の短周期(0.5~1.5Hz)と長周期(1.5~4.0Hz)のスペクトル比を、交感神経の活性度合いとするものである。こちらについては全身温冷感についての予備的な検討が既に行われており⁹⁾、これにより、NIRS との同時計測による評価の頑健性、あるいは NIRS で十分に評価できない温冷感・快適感の補完的評価に寄与すると考えられる。最終成果として、空調における温冷感・快適感に賦活する脳の部位を特定し、心拍波形の特徴を抽出するなどにより、計測負荷を減らしたより簡易な計測のシステムを提案する。

3. 研究の方法

近年、五感などの感覚・知覚との関係を探るため、血流や血液の酸素化の度合いを計測して神経活動との関連を非侵襲的に評価することが NIRS によって可能となっている。すなわち簡易な機器によって、頭皮上から近赤外光を照射することで脳機能を広い範囲でマッピングすることができ、脳活動の計測結果は、客観値が連続変数で得られ、また時間的な連続計測も可能である。また NIRS では fMRI のように被験者の行動を制約することなく計測できる。

一方で心拍波形については、従来心理ストレスの計測に既往研究があるが、温冷感・快適感については研究分担者らによる検討が新規性をもつものである。計測は、東京大学の小野寺宏研究室が開発した小型の心拍計を使用する。サンプリング周波数は 204Hz で、0.05 秒間隔の測定を可能とし、計測データは USB 受信機に転送する仕組みになっている。心拍波形の短周期(0.5~1.5Hz)と長周期(1.5~4.0Hz)のスペクトル比を指標として、交感神経と副交感神経の相対的な活性度合いを評価できる。NIRS との同時計測での結果の関連を知る意義だけでなく、温熱感・快適感を客観的に評価するという本研究の目標に対して両方で計測を行うことが研究遂行上のリスク回避にもなる。さらに、NIRS による計測値には心拍による影響を含むので、心拍波形を

同時に計測することにより、生理的な影響を取り除くことにも寄与する。

4. 研究成果

(1) 基盤研究 B(2014-2016)に引き続き、NIRS による脳血流中の Oxy-Hb 濃度変化と温冷感・快適感との関係に着目し、まず手部への局所温感について NIRS による計測結果との関連を解析した。2017年7月11日~7月25日の期間に行った8名の被験者に対して行った実験のプロトコルは、1セット8分間とし、刺激温度の順序を変えた計2セットを行った。基準温度(33)に触れているときをレスト期間とし、タスクとして冷刺激を13と23、温刺激を40と45とし、タスクの前にはレスト期間をはさむようにした。実験の結果は、前頭部の感度が高く、またより前頭の部位ほど Oxy-Hb 濃度変化が大きくなる傾向が見られた。快適感については、夏季に行った本実験では23,13を快適とするVAS申告が多くなった一方で、その Oxy-Hb 濃度の変化は個人差が大きい傾向を示しており、快適感の増加と Oxy-Hb 濃度の増加に相関があるということとはできないといえる。当初に期待した温冷感と快適感と Oxy-Hb についての相関をクリアに観察することはできなかった。

(2) 2018年12月25日から2019年1月7日に行った全身刺激の実験は、のべ40名の被験者について実験時間は30分とし、実験開始直前まで室内をエアコンを用いて冷やした状態で開始した。実験中は最初の15分間はエアコンとヒーターを用いて部屋を暖め、15分経過後はエアコンのみを使用して冷却していき、合計で30分経過したタイミングで実験を終了した。この30分間において被験者は、実験開始時とその後の3分おきに温冷感と快適感の主観申告を行なった。心拍計測と NIRS による Oxy-Hb 濃度変化、また皮膚温度を同時計測した。心拍計測からはストレス指標として知られている LF/HF 比(高周波・低周波比)を推定したが、温冷感と LF/HF 値については、実験開始後3分から15分までの間、徐々に温感が高くなるとともに LF/HF 値が小さくなった(図1)。また15分以降の冷房を使用した時間帯を見ると、冷房に切り替わった15~18分のデータにおいて、急激に LF/HF の値が増加していることが分かる。冷房に切り替えたことにより急激に温度変化が起きたためと考えられ、漸次変化ではない温度変化に対しては、LF/HF 値を温冷感に対する指標として用いるのは難しいことを示唆している。次に快適感と LF/HF 値に関しては、温冷感とは異なり、一定の傾向を見出すことはできなかった。不快と感じている群と快適と感じている群の LF/HF 値に差異が見られないため、快適感の指標として LF/HF 値を用いることは難しいと考えられる。ただし、温度を漸次変化させていったため、安定して快適および不快と感じることができなかった可能性もある。一方で、図2のように Oxy-Hb 濃度変化と温冷感については弱い正の相関が観察された一方で、快適感については相関が見られない結果となった。

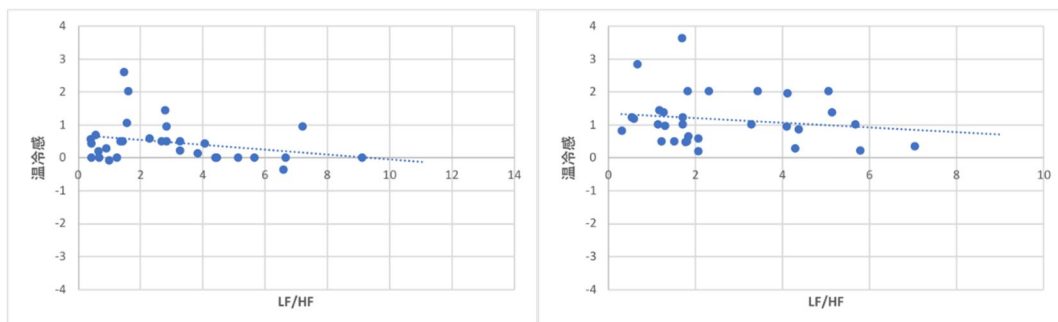


図1 温冷感スコア(縦軸)と LF/HF 値(横軸)のプロットの例(昇温時0分~3分(左)、昇温時3分~6分(右))

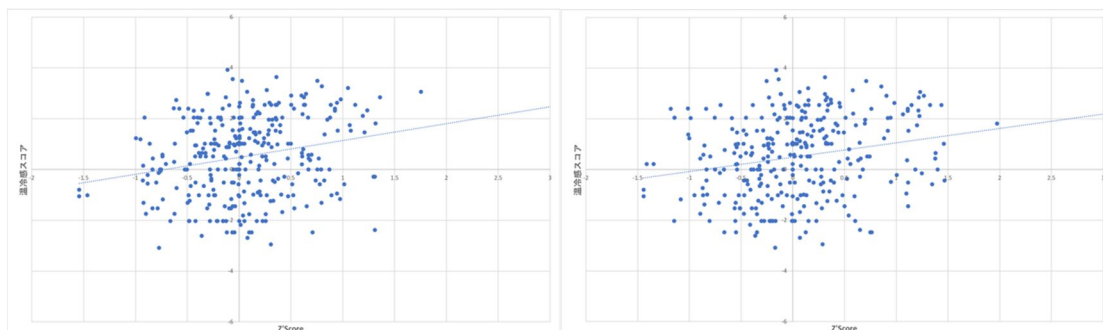


図2 温冷感スコア(縦軸)と ZScore(Oxy-Hb 濃度変化の正規化値;横軸)のプロット(左が、前頭部 Ch1、右が Ch2)

(3) 生体信号と人間の温冷感がどのように関係しているかを検証するため、温熱環境を制御した環境実験室において、2018年9月に8名の被験者に対して、90分間の全身の温熱刺激を与え

る実験（10 分間のレスト、20 分間の 28℃ 保持、30 分間で降温、30 分間で 29℃ まで昇温）を行い、各人の皮膚温度 8 点ならびに心拍波形を連続計測した。計測の結果から、LF/HF 比、ならびに環境温度と皮膚温度の差から推計される Heat Flow Rate を求めた（図 2）。その結果、Heat Flow Rate が大きいとき、すなわち人体からの環境への熱移動が大きいとき（被験者が寒いと感じるとき）と、Heat Flow Rate が小さく、人体からの環境への熱移動が小さい（被験者が暑いと感じるとき）に LF/HF 比が大きくなり、人体から環境への熱移動が中庸のとき（被験者が快適と感じるとき）に LF/HF 比が小さくなることが明らかになった。

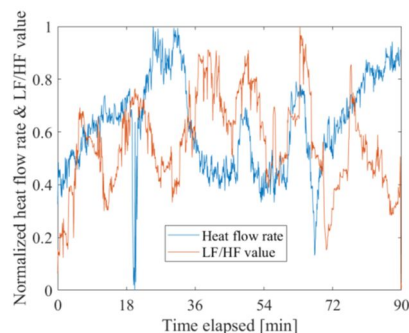


図 2 Heat flow rate と LF/HF 比の計測例

(4) (2)(3)の結果を総合すると、以下の結論を導くことができる。すなわち、温感領域においては昇温につれて LF/HF 比が上昇し、Oxy-Hb 濃度変化が大きくなる一方で、冷感領域においては降温につれて LF/HF 比が上昇し、Oxy-Hb 濃度変化が小さくなる傾向が明らかになった。Oxy-Hb 濃度変化は前頭葉で主に賦活する傾向が見られた。これらの結果は、生体信号による温冷感抽出のシステム化に道を開くための重要な知見といえる。

< 引用文献 >

- i) Rolls ET, et al., Warm pleasant feeling in the brain. *NeuroImage* 41:1504-1513, 2008
- ii) 候ら, “ NIRS を用いた局所温冷刺激に対する脳賦活反応解析 ”, 日本機械学会論文集, Vol.81, No.830(2015)
- iii) 高津ら, “ 心拍変動による精神的ストレスの評価についての検討 ”, 電気学会論文誌 C, 120(1), 104-110(2000)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Ziyang Wang and Ryuji Matsuhashi,	4. 巻 40
2. 論文標題 Research on Thermal Comfort by Analyzing LF/HF Value and Heat Flow Rate	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Society for Energy and Resources	6. 最初と最後の頁 154-159
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.24778/jjser.40.5_154	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 李 和聡, 王 子艦, 吉田 好邦, 井原 智彦, 松橋 隆治
2. 発表標題 脳血流のヘモグロビン濃度計測に基づく温冷感と快適感の客観的評価
3. 学会等名 第34回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ihara T, Narumi D, Fukuda S, Kondo H
2. 発表標題 Evaluation of sleep disorder caused by urban heat island based on the Pittsburgh Sleep Quality Index
3. 学会等名 The 5th International Conference on Countermeasures to Urban Heat Islands (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 方儒ゲツ, 山口和貴, 玄地裕, 井原智彦
2. 発表標題 東京都区部の各街区における鏡面反射・再帰反射を考慮した都市キャノピーモデルを用いた再帰反射フィルムによる屋外熱環境の改善効果及び省エネ効果の評価
3. 学会等名 第14回日本ヒートアイランド学会全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 張典, 井原智彦
2. 発表標題 2050年代のジャカルタにおける性別を考慮した睡眠障害の予測
3. 学会等名 第14回日本ヒートアイランド学会全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 井原智彦, 山口和貴, 三木勝夫
2. 発表標題 東京オリンピック・パラリンピックにおけるマラソン・競歩沿道等の暑さ対策
3. 学会等名 第14回日本ヒートアイランド学会全国大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	井原 智彦 (Ihara Tomohiko) (30392591)	東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授 (12601)	
研究 分担者	松橋 隆治 (Matsuhashi Ryuji) (80229517)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授 (12601)	