

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

環境システム学専攻 47-166677 李和聡 (指導教員: 吉田好邦教授)

Keywords: 温熱感覚、近赤外分光法、脳活動計測、空調制御

1. 序論

熱中症対策や空調デザインなどを目的として、いかに温熱的な快適性を損なわずにエネルギー消費を抑制できるかが重要となっている。空調工学における従来の温熱指標は主観的申告に基づく指標が多いが、個別の温熱感覚を客観的かつ正確に評価し、空調制御に利用されることが望ましい。人間が環境に対して温冷感や快適感を覚える際には脳活動が生じるため、これを計測することにより客観的に温熱感覚を評価できる可能性がある。脳活動の客観計測方法として、脳血流のヘモグロビン濃度の変化を計測し、被験者への拘束性が比較的低い近赤外分光法(Near-infrared spectroscopy, NIRS) ^①が注目されている。NIRSを用いた既往の研究では、近藤ら^②は、室温を10分間変化させ、その間の前頭前野における脳活動をNIRSにより計測した結果、前頭前野における酸素化ヘモグロビン(Oxyhemoglobin; Oxy-Hb)濃度の変化は、室内温度変化との間で、また被験者による温冷感申告とも相関性があるとしている。またこれに続く報告として、俣ら^③は、局所的な温冷刺激を与えた際の体性感覚野と前頭前野における脳活動をNIRSにより計測し、体性感覚野で、温度差が-20℃のときにほかの温度条件と比較してOxy-Hb濃度が増加する傾向があることを示している。一方、畑ら^④は、足部刺激実験では高温の際にOxy-Hb濃度が増加し、低温の際にOxy-Hb濃度が減少することが確認している。井原ら^⑤、畑ら^⑥は、局所刺激に特化して、被験者の足部に対して温熱刺激を与えた時、冷刺激に関しては脳血流の低下が計測されたとしている。

以上の研究では全身に対して温熱刺激を行う実験の後に局所的な刺激を行う実験を実施

しており、全身刺激による計測が容易ではないことが示唆される。そこで本研究では畑ら^⑥に引き続き、局所的な刺激に限定して計測を行う。

2. 脳活動計測実験

(1) 実験概要

時期により温冷感が異なることを想定し、2016年11月(実験Ⅰ)と2017年7月(実験Ⅱ)の2つの時期に行った。実験Ⅰでは9名、実験Ⅱでは15名の20代の男子学生を被験者とした。被験者を実験室内で着席させ、頭部にNIRS計(LABNIRS; 島津製作所)を装着した(図1左)。俣ら^③の方法に従い、温度コントロールユニット(ペルチェ温度コントローラセット; ビックス)を用いて温度の異なる5種類の温冷刺激を左手へ与え(図1右)、刺激時の脳血流をNIRSによって計測した。一定の時間間隔で温度を変更する実験プロトコルを用意し、温度が変わるタイミングで左手を別のユニットに動かすことにより異なる温度刺激を与えた。NIRS計は、脳血流44ch(前頭部22ch, 後頭部22ch)、および皮膚血流3ch(前頭左右, 頸部)におけるOxy-Hb濃度の計測開始時からの変化量を24m秒ごとに計測する。計測chの位置は図2の通りである。また主観的な温冷感・快適感との相関を調べるために、刺激温度の変更時、すなわち接触ユニット移動直前時に温熱刺激に対しての温冷感・快適感をそれぞれ評価してもらった。被験者は温熱刺激に対して、予め定められた申告の時間帯に、決められた方法で温冷感と快適感を評価する。申告はVisual Analogue Scale (VAS) (図3)を利用し、被験者には自身の感覚を線の記入により申告し、中立点からの距離を計測することで感覚を点数化した。

ただし、VAS の場合記入をするという動作により NIRS 計測値に影響を与えてしまうと考えられる。しかし予備実験において、記入動作は計測値に大きな影響を及ぼさないことを予め確認した上で実験を行った。

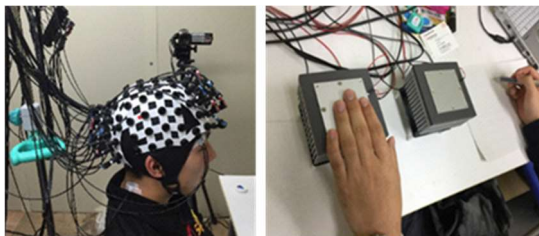


図1 実験の様子
(左:NIRS計の装着, 右:手部の温度刺激)

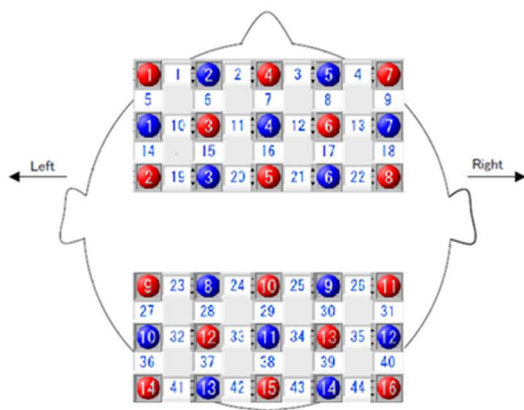


図2 NIRS計の計測44chの位置

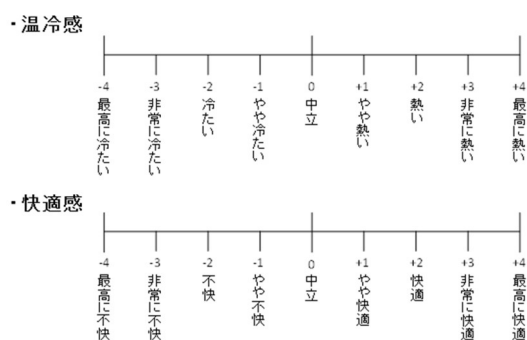


図3 Visual Analogue Scale の概要

(2) 結果の解析方法

得られた計測データに前処理として①皮膚血流影響の除去, ②計測値の Z-score 化, ③線形成分の除去を行った。①では、NIRS 計による測定値には頭皮の皮膚血流の影響が含

まれているため⁷⁾、SegICA (Segment Independent component analysis) を用いてその影響を取り除いた。②では、NIRS 計の測定値は被験者およびチャンネル間で光路長が異なり直接比較ができないため、Z-score 化することにより比較を可能とした。③では、温冷刺激以外の影響で濃度が変動する影響を取り除くために行った。

3. 実験 I

(1) 実験概要

実験 I は 2016 年 11 月 29 日～12 月 12 日の期間に東京大学柏キャンパス内の実験室内に設置した、室温等をコントロールした環境試験室内で行った。図 4 に実験のプロトコルを示す。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ている。

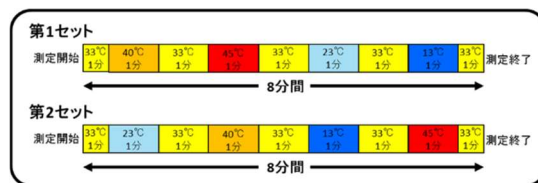


図4 実験 I の温度刺激のプロトコル

刺激時の Oxy-Hb 濃度変化は、レスト終了時が基準温度の 33℃における感覚、タスク終了時が刺激温度における感覚を表すことを鑑み、レストおよびタスクの終了直前の 5 秒間平均をとり、両者の差分を温度刺激による効果とした。

(2) 実験の結果

Oxy-Hb 濃度変化を全 44ch について計測した結果、主に前頭 (ch1～ch22) における感度が高く、特に ch1～ch4 の部位 (前頭の額近辺) が賦活する傾向が見られた。

図 3 の VAS による温冷感または快適感の申告値を横軸、NIRS による基準温度 (33℃)

からの Oxy-Hb 濃度変化を縦軸として、各被験者の結果をプロットする。図 5 は 9 名の被験者のうち被験者 A の ch2 における温冷感のプロットを示したものである。温冷感の申告は 40℃と 45℃が中立より右に、23℃と 13℃が中立より左にプロットされており、Oxy-Hb 濃度変化は 40℃で増加、23℃と 13℃で減少している。このようなプロットの傾向は個人差があるが、図 5 のプロットの位置関係は比較的共通して観察されたパターンのひとつである。

図 6 は ch2 について、被験者 A だけでなく、9 人の同様のプロットを温冷感と快適感を別に重ねたものである。温冷感では、図 5 の被験者 A と同様に Oxy-Hb 濃度の 40℃での増加と、23℃、13℃での減少が多く観察され、温感が高いほど Oxy-Hb 濃度が増加する傾向がみられる。一方快適感では、中立よりも相対的に快適である図の右半分の領域にプロットされたのは 40℃のみであった。その結果、快適感が増加するほど、Oxy-Hb 濃度が増加する傾向が観察された。

これらの結果より、Oxy-Hb 濃度の増加と、温感または快適感の相関が示唆されるが、40℃に対する多くの VAS 申告が、温感と快適感の両方を示しているため、温感と快適感を区別することが困難であった。したがって、冷感と快適感が共通する VAS 申告を得ることを想定し、別途、夏季における実験を行うことにした。

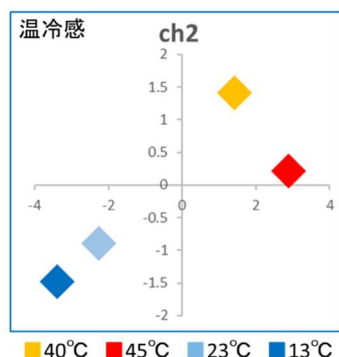


図 5 被験者 A の温冷感の VAS 申告値 (横軸) と ch2 における基準温度 (33℃) に対する Oxy-Hb 濃度変化 (縦軸)

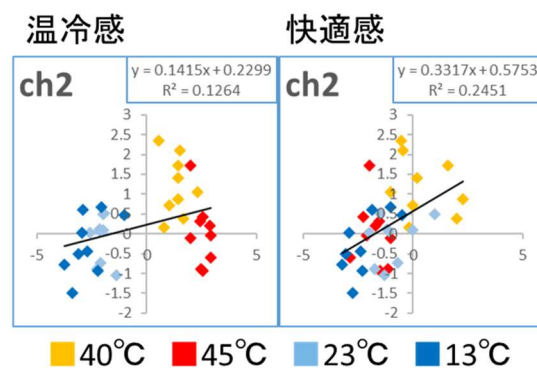


図 6 9 人の被験者の温冷感 (左) と快適感 (右) の VAS 申告値 (横軸) と ch2 における基準温度 (33℃) に対する Oxy-Hb 濃度変化 (縦軸)

4. 実験 II の結果

(1) 実験概要

実験 II は 2017 年 7 月 11 日～7 月 25 日の期間に東京大学柏キャンパス内の環境試験室内で行った。実験のプロトコルは、図 4 と同じプロトコルを設定した。

(2) 実験の結果

実験 I と同様に、前頭 ch1～ch22 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。図 7 は被験者 J の ch1 における温冷感のプロットを示したものである。温冷感の申告は 40℃と 45℃が中立より右に、23℃と 13℃が中立より左にプロットされており、Oxy-Hb 濃度変化は 40℃で増加、23℃と 13℃で減少している。図 7 のプロットの位置関係は比較的共通して観察されたパターンのひとつである。

図 8 は ch1 について、被験者 J だけでなく、8 人の同様のプロットを温冷感と快適感を別に重ねたものである。温冷感については図 6 左と同様な結果であった。一方で、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、図 6 右の結果とあわせて、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はいえないといえる。

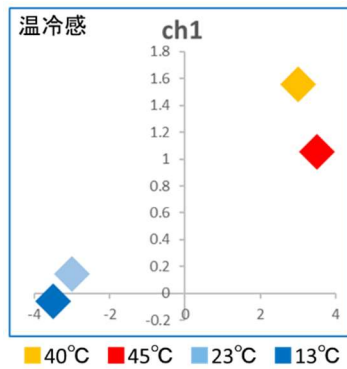


図7 被験者Jの温冷感のVAS申告値(横軸)とch1における基準温度(33°C)に対するOxy-Hb濃度変化(縦軸)

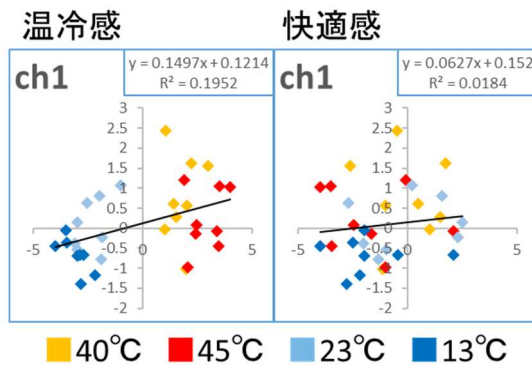


図8 8人の被験者の温冷感(左)と快適感(右)のVAS申告値(横軸)とch1における基準温度(33°C)に対するOxy-Hb濃度変化(縦軸)

5. 結論

冬季に行った実験Iでは、温感と快適感の申告値が増加するほど、Oxy-Hb濃度が増加する傾向が観察された。夏季に行った実験IIでは、冷感と快適感を両立する温度刺激(23°C, 13°C)において、必ずしも快適感の増加と、Oxy-Hb濃度変化が相関しないとの結果を得た。この結果より、温感を増加させる温度刺激(40°C)とOxy-Hb濃度の増加が相関していることが観察された。

また温熱刺激による脳の賦活部位については、前頭に近づくほどOxy-Hb濃度が増加することが観察された。今後、局所温熱感覚に

関わる脳の活動位置や反応傾向をより明らかにすることで、NIRSによる評価方法が確立される。その方法を基に、将来的には全身性温熱感覚の評価につなげることで、空調制御に関わる屋内での温熱感覚の評価に用いることができるようになると考えられる。

参考文献

- (1) 酒谷薫他, NIRS—基礎と臨床—(2012), 新興医学出版社
- (2) 近藤祐樹, 侯磊, 綿貫啓一. NIRSを用いた室内空調の温熱的快適性評価(室内温度変化に伴う脳賦活解析). 日本機械学会論文集, Vol.79(807), pp.4075–4083, 2013
- (3) 侯磊, 綿貫啓一, 外池雄亮. NIRSを用いた局所温冷刺激に対する脳賦活反応解析(冷刺激により痛覚刺激が生じた際の脳賦活反応) 日本機械学会論文集, Vol.81, No.830, 2015
- (4) 畑智也, 高橋智哉, 吉田好邦, 井原智彦, 脳活動計測に基づく温冷感の客観的評価の試み, バイオクリマ研究会, 2015年3月
- (5) 畑智也, 高橋智哉, 吉田好邦, 井原智彦, 温冷刺激時の脳活動計測による温冷感の客観的評価, 日本ヒートアイランド学会第10回全国大会, 2015年8月
- (6) 井原智彦, 吉田好邦, 省エネルギー型空調の実現に向けた脳活動計測による温熱感覚の評価, JST 低炭素社会戦略センター・イノベーション政策立案のための提案書, 2016
- (7) Takahashi T et al, Influence of skin blood flow on near-infrared spectroscopy signals measured on the forehead during a verbal fluency task, NeuroImage, 57-3(2011), 991-1002