

低炭素社会の実現に向けた
技術および経済・社会の定量的シナリオに基づく
イノベーション政策立案のための提案書

社会システム編

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

平成28年3月

**Assessment of Thermal Sensation by Brain Activity Measurement
for Implementation of Energy-saving Air Conditioning**

Strategy for Social System

Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action
toward Low Carbon Societies

国立研究開発法人科学技術振興機構
低炭素社会戦略センター

LCS-FY2015-PP-13

概要

民生エネルギー消費の 1/3 を占める空調の省エネルギーに関して、ヒートポンプの高効率化のほか、空調利用の制限が訴えられているが、同時に温熱快適性を維持する必要がある。本文書は、脳活動を計測することにより、居住者の温熱感覚を評価できる可能性を示したものである。将来は、居住者の温熱感覚の計測情報を空調制御に用いることによって、温熱快適性を維持しつつ、空調の省エネルギーを実現する手法を提案できると考えている。

Summary

Energy consumption from air conditioning accounts for 1/3 of energy consumption in commercial and residential sectors. Restriction on use of air conditioning (cooling and heating) as well as increase in heat pump efficiency is a measure effective on energy conservation. However, thermal comfort is also required simultaneously. This document shows the possibility that brain activity measurement can assess occupants' thermal sensation. We will be able to propose a method to implement energy-saving air conditioning by utilizing occupants' thermal sensation measured for air conditioning control in the future.

目次

概要

1. 提案の目的と背景	1
2. 温熱感覚の客観的評価	3
2.1 温熱感覚と脳活動	3
2.2 脳活動の計測	3
3. 近赤外分光法 (NIRS)	4
3.1 近赤外分光法とは	4
3.2 測定原理	4
4. 近赤外分光法 (NIRS) による温熱感覚の客観的評価	4
4.1 実験の目的	4
4.2 実験概要	5
4.3 計測値の後処理方法	7
4.4 評価方法	9
4.5 結果	10
4.6 考察	11
5. 今後の展望	12
参考文献	13

1. 提案の目的と背景

本提案^{[1][2][3]}が目指すのは、居住者の温熱感覚の評価に基づいて空調制御を高度化することにより、いっそうの省エネルギーを図ることである。

提案の背景としては、産業部門や運輸部門と異なってエネルギー消費の伸びが未だに著しい家庭部門・業務部門において、人間の温熱快適性を維持するためのエネルギー使用が、両部門のエネルギー消費の中で大きな割合を占めることにある。

たとえば、空調は、室内環境の温熱快適性を向上・維持するために用いられている。温熱快適性の向上のために空調が多く利用されるようになると、その分空調利用に要するエネルギー消費も多くなる。2013 年度には、空調がエネルギー消費全体に占める割合は、家庭部門で 26%、業務部門で 32% に達した（図 1 参照）。空調に限らず、給湯やその他温熱快適性を提供する動力も、温熱快適性を向上するためのエネルギー使用として位置づけられるため、実際にはさらに大きな割合を占めている。

そのため、低炭素社会を実現するためには、空調の省エネルギーも推進する必要がある。高効率ヒートポンプの開発のほか、空調利用の緩和も施策になりうる。その一つの例として、環境省は冷房・暖房の温度設定をそれぞれ 28℃・20℃に推奨することで省エネルギーを図っている。しかし、本来温熱快適性を向上させるために空調は利用されるので、空調の省エネルギーには人々の温熱快適性の制約が伴う。

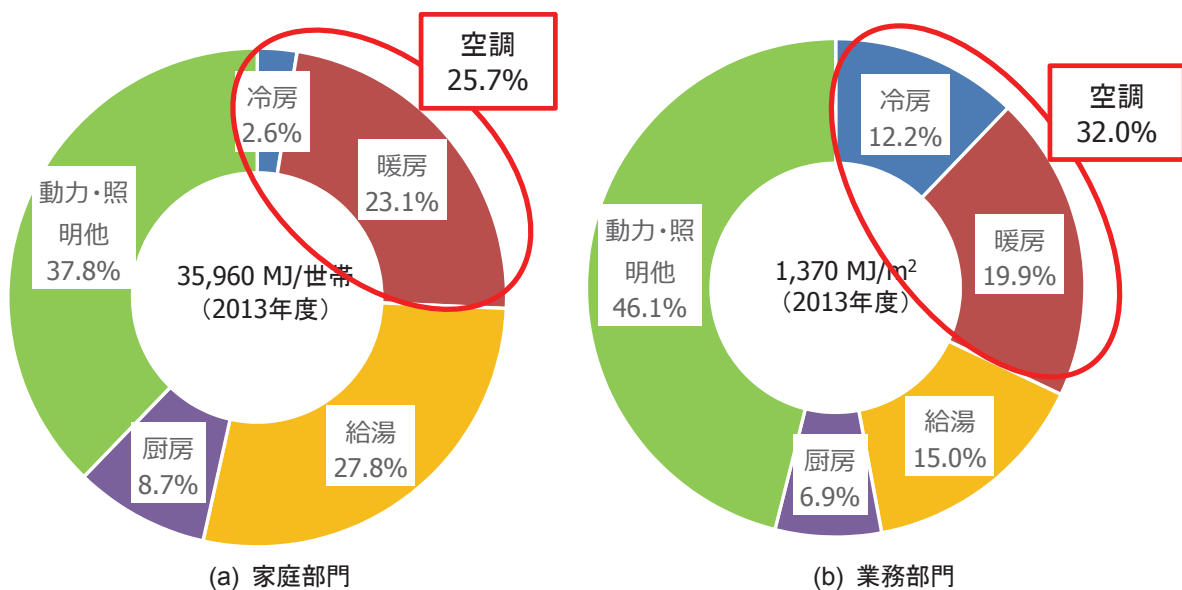


図 1 部門別エネルギー消費用途内訳 (2013 年度)
(エネルギー白書 2015^[4]より作成)

温熱快適性を満たしつつ、過剰な空調の提供を削減することで省エネルギーを図るためには、居住者の温熱快適性を正確につかむことが必要となってくる。ここでいう温熱快適性とは、人間が温熱環境に対して、どの程度暑い／寒い、快適／不快に感じるかという温熱感覚を基に評価される。

温熱感覚をどのように評価するかについては、暖冷房技術、気象学や心理学、生理学など、さまざまな分野で研究されてきた。例えば暖冷房技術の分野では、温度や湿度など温熱 4 要素から、人々の温冷感や快適感を予測する研究がなされてきた。生理学の分野では、温熱要素や人体側の要素が体温調節機能をどのように作動させるのか、発汗や血流量の変化などの生理的な反応

が温熱感覚とどのように関連するのか、などが研究されてきた。しかし、研究を通じて開発されてきた温熱指標（SET* や PMV など¹⁾）は必ずしも万能ではない。例えば図 2 は SET* と温熱感覚の対応を示したものであるが、SET* は温度分布が均一でない環境下での評価には適さないと指摘されている^{[5][6]}。また、温熱環境が同一でも個人によって温熱感覚は異なる場合があるため^[7]、温熱指標は個人による温熱感覚の違いを表現できていない。したがって、過剰な空調を削減すべく温熱快適性を正確につかむには、温熱指標を評価するのではなく、個人の温熱感覚そのもの（温冷感・快適感）を評価する必要がある。

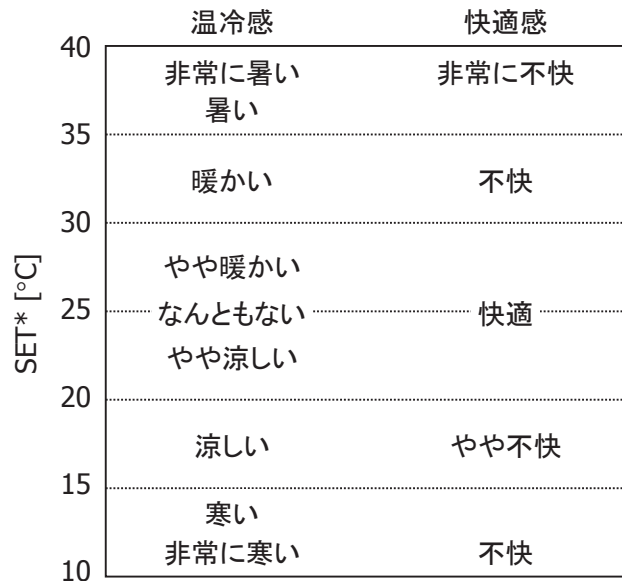


図 2 SET* と温熱感覚の対応^[8]

個人の温熱感覚の評価は、これまで主観申告が用いられてきた。感覚の程度に応じてあらかじめ設定されたスコアを示し、被験者は自分の感覚にふさわしいと思うスコアを申告する。温冷感や快適感の程度を表すカテゴリー・スケールとして、表 1 に示すものがよく用いられている^[9]。申告スコアは一定間隔の離散値となっている。

表 1 温冷感と快適感のカテゴリー・スケール（文献 [9] を基に作成）

スケール	-3	-2	-1	0	1	2	3
温冷感	Cold 寒い	Cool 涼しい	Slightly cool 少し涼しい	Neutral 中立	Slightly warm 少し暖かい	Warm 暖かい	Hot 暑い

スケール	0	1	2	3
快適感	Comfortable 快適	Slightly uncomfortable やや不快	Uncomfortable 不快	Very uncomfortable 非常に不快

¹⁾ SET*（Standard New Effective Temperature、標準新有効温度）、PMV（Predicted Mean Vote、予測平均温冷感申告）。

しかし、主観申告による温熱感覚の評価を、空調制御に用いるのは、2つの点で困難である。1つ目は、主観申告の煩わしさである。空調は連続して制御する必要があるが、絶えず主観申告をおこなうのは不可能に近い。もう1つは、主観申告値が必ずしも絶対的なものとはいえない点である。たとえ同じ-2点のスコアが申告されても、個人間で「涼しい」の解釈が異なれば、本当は異なる程度の温冷感を感じているかもしれない。また、回答者は嘘の主観申告をおこなうこともできるし、質問者が申告値を誘導することもできてしまう。主観申告には問題があり、個々人の温熱感覚を適切に計測できているとはいえない。したがって、個人の主観に頼らない客観的な尺度によって、温熱感覚を計測・評価できることが必要である。

以上を踏まえて、居住者の温熱感覚を客観的に評価し、評価値を参照して居住者温熱快適性を維持するように空調を制御することによって、空調のエネルギー消費を削減することを提案する。

2. 温熱感覚の客観的評価

2.1 温熱感覚と脳活動

人間の脳は、前頭部や後頭部などで役割が異なる機能局在性を示す^[10]。外部からの触覚や温度感覚には体性感覚野が賦活する^[11]。人間は快適もしくは不快と感じた場合、思考や感情に関係するといわれている前頭前野が賦活する^[12]。温熱的に快適または不快という感覚についても、前頭前野が賦活するのではないかと考えられる。したがって、脳賦活反応を計測することで温熱感覚を評価できる可能性がある。脳活動の計測結果は、被験者の解釈など主観的な感じ方に頼らない、被験者が感じている本来の感覚を反映するのではないかと考えられる。

2.2 脳活動の計測

脳活動を非侵襲に計測する手法としては、脳磁図 (magnetoencephalography, MEG)、脳波計測法 (electroencephalogram, EEG)、陽電子放射断層撮影法 (positron emission tomography, PET)、機能的磁気共鳴画像法 (functional magnetic resonance imaging, fMRI)、近赤外分光法 (near-infrared spectroscopy, NIRS) などがある。

これらの脳活動計測手法は、計測されるパラメーターの違いから、1～3次信号検出型方法の3つのタイプに区分することができる (図3参照)。

- 1次信号検出型方法：脳の神経活動を反映した信号変化を検出する MEG や EEG
- 2次信号検出型方法：脳の基質であるグルコースや酸素などの代謝変化を測定する PET
- 3次信号検出型方法：脳活動の変化で生じる局所的な血行動態変化を反映する fMRI や NIRS

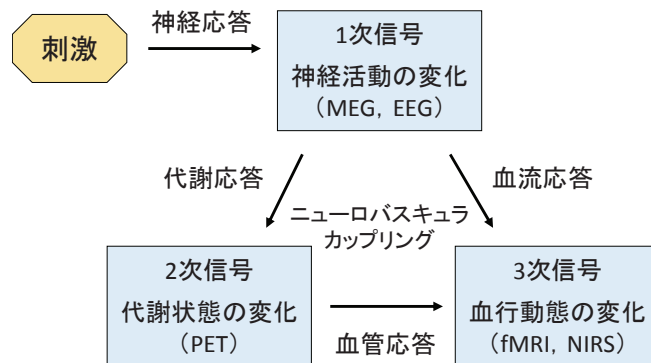


図3 脳活動計測の生理学的背景^[13]

このうち EEG と fMRI には、脳活動と温熱感覚の関係に関する先行研究が存在する（EEG に関しては石澤ほか^{[14][15]}や Yao et al^[16]など、fMRI に関しては Becerra et al^[17]、Brooks et al^[18]や Rolls et al^[19]など）。先行研究より、EEG は温熱環境下での作業効率性といった副次的な項目は評価可能であるが、温熱感覚そのものの定量的評価には適さないことがわかっている。一方、fMRI は Rolls et al^[19]より温熱感覚そのものを定量的に評価できる可能性があることがわかっているが、被験者にとって非常に拘束性が高く、空調制御への活用という最終的な目的には適さない。

そこで、fMRI と同じく脳内の血行動態変化を計測する NIRS に着目する。NIRS の計測には、頭部に光を照射・検出するためのプローブを装着するだけなので、fMRI と比較して扱いやすく、拘束性も高くない^[20]。Miyazawa et al^[21]が運動中の脳活動を計測しているように、動きながらの計測も NIRS は可能である。技術の進歩により携帯しながら計測ができる NIRS 計も開発されている。したがって、日常的な状況における温熱感覚の脳活動計測が NIRS では可能になるだろう。ただし、NIRS による温熱感覚の研究は、生産性を評価した Tanabe et al^[22]、一部の部位のみを評価した近藤ほか^[23]、匂いを評価した小林ほか^[24]にとどまり、温熱感覚そのものと NIRS 計測値の関係は定量化されていない。そのため、まず NIRS で温熱感覚を計測する手法を確立する必要がある。

3. 近赤外分光法（NIRS）

3.1 近赤外分光法とは

人間は、視覚や聴覚、触覚、嗅覚、味覚などの情報を感覚器（目や耳、皮膚など）から取り込むと、それらを電気信号に変換して脳に伝達する。そして脳内に存在するニューロンが、その情報を相互に伝達・処理することで行動決定をおこなう。その際に酸素化ヘモグロビン（Oxy-Hb）が毛細血管内を經由して酸素供給をおこなう。

近赤外分光法（NIRS）とは、近赤外光を用いることによって生体内の Oxy-Hb 濃度変化を非侵襲的に計測して、脳の機能局在を明らかにできるものである^{[25][26]}。言語機能障害の診断など^[27]の脳神経外科の分野や、うつ症状の診断など^{[28][29]}の精神科・神経内科の分野などに主に用いられている。

3.2 測定原理^[30]

近赤外光とは波長が約 700 ～ 1,000 nm の電磁波であり、生体透過性が高い可視光（波長 350 ～ 700 nm）とは異なる特徴がある。頭部から照射された場合には、血液や骨、皮膚、脳組織などの頭部の構成成分で吸収と散乱を繰り返し減衰していく。

血液中のヘモグロビンは酸素化状態によって吸光度が変化する。近赤外光の波長域での光の吸収は、酸素が結合した酸素化ヘモグロビン（Oxy-Hb）と結合していない脱酸素化ヘモグロビン（Deoxy-Hb）によって生じる。ここで、両者は吸光スペクトルが異なるため、近赤外光が通る組織中のヘモグロビンの酸素化状態が変化する（例：酸素化が進み Oxy-Hb が増加、Deoxy-Hb が減少など）と、それに応じて吸光スペクトルに従って光の強度が変化する。したがって、この光強度変化の計測によって、Oxy-Hb と Deoxy-Hb の濃度変化を算出することができる。

4. 近赤外分光法（NIRS）による温熱感覚の客観的評価

4.1 実験の目的

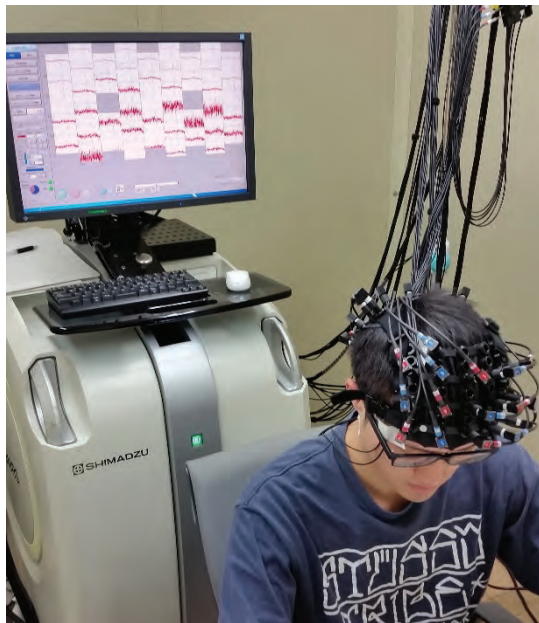
最終的な目標は、NIRS により脳活動を計測することで温熱感覚を客観的に評価し、空調制御に応用することである。しかし、NIRS と温熱感覚の関係はほとんどわかっていない。そこで、ここでは、基礎的実験として局所性の温熱感覚を脳活動で評価することを目的とした。

4.2 実験概要

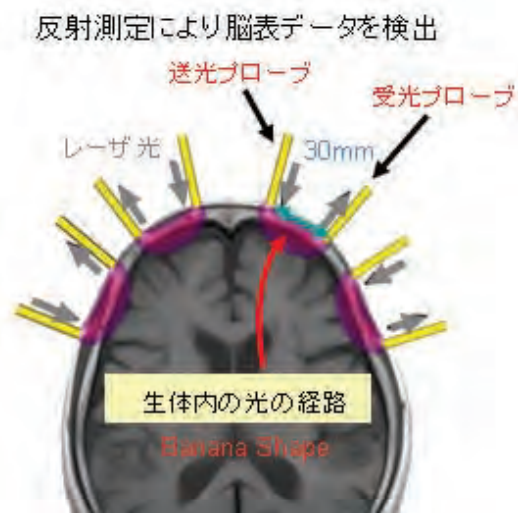
実験では、被験者に対して温熱刺激を与えた時の脳活動を計測することで、温熱感覚と脳活動の関係を検証する。脳活動の計測方法として NIRS を用いる。

被験者として 20 代の男子学生のみを対象とした。NIRS による温熱感覚評価は先行研究が少なく、本実験も基礎的実験と位置付けている。したがって年代や性別の影響を取り除くために 20 代男子学生に限定した。被験者は実験室内で座位・安静状態、頭部に NIRS 計を装着させる。計測項目は以下の通りである。

- 脳血流ヘモグロビン濃度変化 (Oxy-Hb、Deoxy-Hb、Total-Hb) – NIRS 計 (図 4 参照)
 - 前頭・後頭各 22 チャンネル、全 44 チャンネル、送光プローブと受光プローブの間隔は 3 cm に設定
 - 脳血流の 44 チャンネルの位置の概要図を図 5 とする。図中の数字部分がチャンネル位置となり、赤い部分は送光プローブの位置、青い部分は受光プローブの位置を示す。
- 皮膚血流 – NIRS 計 (左右額部分・頸部全 3 チャンネル、プローブの間隔は 0.5 cm に設定)
- 主観申告スコア – 温冷感および快適感



計測風景



光経路のイメージ^[31]

図 4 NIRS 計測装置

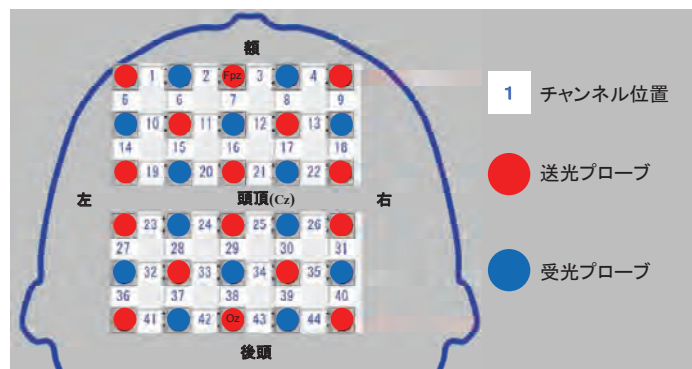


図 5 チャンネル位置概要図

4.2.1 プロトコル

プロトコルは 80 秒 1 セットを計 12 セット連続で繰り返す（ブロックデザイン）。1 セットは、20 秒（レスト）－ 20 秒（タスク）－ 20 秒（レスト）－ 20 秒（申告）で構成される。

- レスト：安静状態、何もしない
- タスク：右足甲に温冷水を封入したビニール袋を 20 秒間接触させ続ける（図 6）、被験者は安静状態のまま
- 申告：主観申告をおこなう、終了したら安静状態に戻る

この 80 秒を基本セットとして、1 セットにつき種類の温度を扱う。各実験期間のプロトコルに応じて、基本セットを繰り返し、一つの刺激温度については 3 セットずつおこなう。

刺激温度と順序については、温刺激実験は 33、40、33、45℃の順番、冷刺激実験は 33、23、33、13℃の順番で、3 周繰り返して合計 12 セットおこなう。温刺激および冷刺激の直前で 33℃を毎回さむことで、直前の刺激の影響を統一する。



図 6 温熱刺激の与え方

4.2.2 主観申告

脳活動計測とあわせて、被験者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う。被験者は、各セットでタスク期間に与えられた温熱刺激に対して、そのセットの申告期間に決められた方法（スコア申告および visual analogue scale (VAS)）で温冷感と快適感を評価する。タスク期間の 20 秒間の刺激に対して、開始時の感覚などではなく、刺激終了時の状態を申告する。申告方法については以下で説明する。

事前に一定の温度の刺激を与えて温冷感・快適感の基準を設定することはしない。個人の感覚に応じて絶対評価をしてもらう。

温冷感・快適感ともに、中心点を中立状態とした ± 10 cm スケールに対して（図 7 参照）、被験者は自身の感覚に該当する部分にチェックを記入する。図のように中心点からの距離が点数になるのだが、± 10 cm を +4 ~ -4 点に換算して評価する。+4 を最高に熱い／快適、-4 を最高に冷たい／不快とする。スコア申告とは異なり連続値での評価が可能になる。

VAS の場合記入をするという動作が入り 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が確認された。また、申告期間の後にレスト期間をとっているため、タスク時の評価には大きな影響は与えないと判断した。

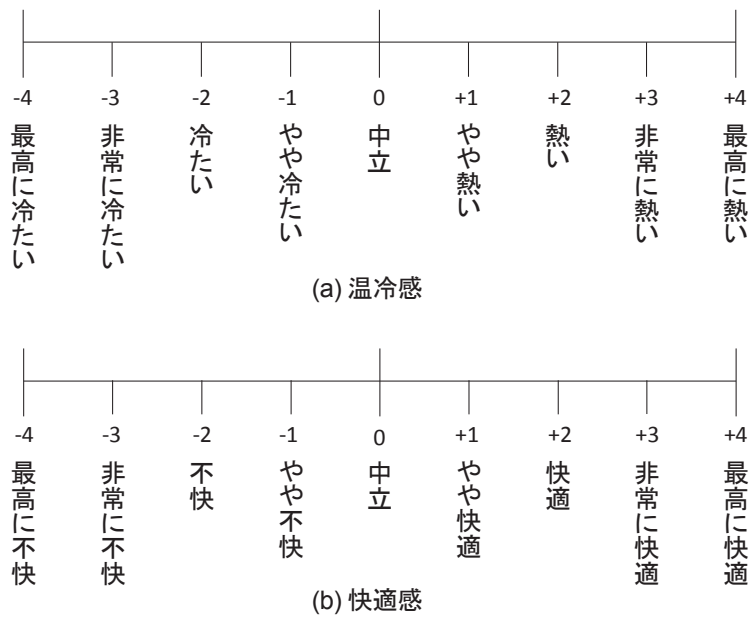


図 7 VAS 図

4.3 計測値の後処理方法

4.3.1 NIRS 計測値

NIRS 計測で得られた信号のうち、Oxy-Hb を解析の対象とする。ラットを用いた実験では、Oxy-Hb 濃度変化が局所脳血流の変化と関連があるとされている^[32]。また Oxy-Hb は脳の賦活反応を最も反映するパラメーターとされている^[33]。

NIRS 信号の Oxy-Hb 濃度変化の計測結果の一部を図 8 に示す。NIRS 計は時間分解能が高く、信号は変動が激しい。また刺激を与えていないレスト期間にも変動することから、必ずしも目的の反応のみが計測されているとは限らない。適切な評価をおこなうには、温熱刺激による影響以外の要素をできる限り除く必要がある。そこで、以下で説明する事前処理をおこなったデータを用いて評価をする。

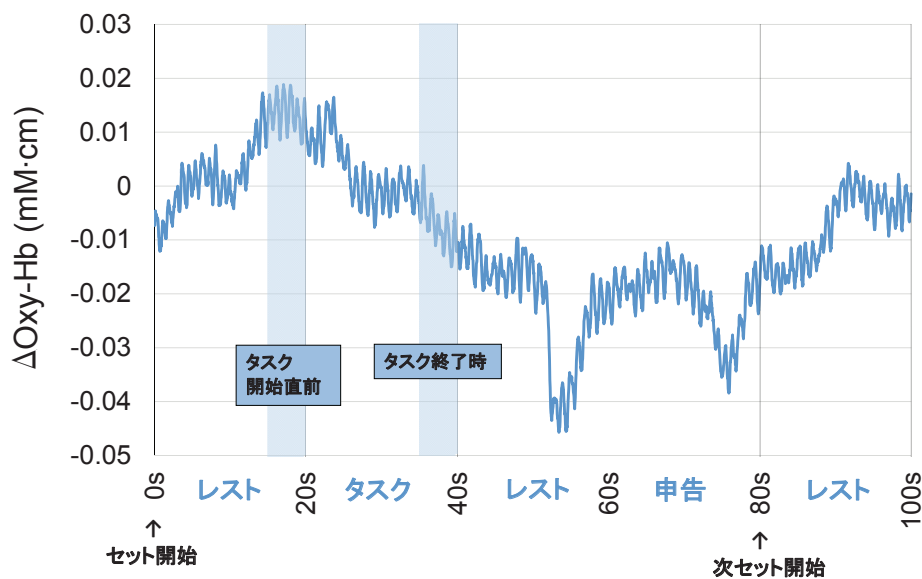


図 8 NIRS 計測結果例 (一部)

4.3.2 皮膚血流除去

NIRS 計の計測値 ($\Delta\text{Oxy-Hb}$) には頭皮血流の影響が含まれている可能性がある。したがって脳血流の評価のために、NIRS 計測値から皮膚血流の影響を取り除く必要がある。本実験では、独立成分分析 (independent component analysis, ICA) を用いた手法で皮膚血流の影響除去をおこなう。

ICA には、NIRS 計の解析ソフト内の SegICA (Segment ICA) を用いた。脳血流 44 チャンネルと皮膚血流 3 チャンネルを区別した 2 つのセグメントでそれぞれ ICA をおこなう。皮膚血流の 3 成分それぞれについて、空間均一係数 (coefficient of spatial uniformity, CSU) を算出し、 $\text{CSU} > 0.5$ となる成分が選択される (CSU の値により 0 ~ 3 成分が選択される)。その選択された成分それぞれについて、脳血流の 44 成分の中で一番相関が高い成分を除去対象とする。

上記の条件を満たす成分がない場合は、頭皮血流の影響が含まれていないと判断して成分の除去はおこなわない。すべての計測結果について SegICA をおこなう。

4.3.3 Z-score 化

SegICA により皮膚血流の影響を除去した計測値 ($\Delta\text{Oxy-Hb}' (= \Delta\text{Oxy}'(t))$) に対して、次式による標準化 (Z-score 化) をおこなう。

$$\text{Z-score}(t) = \frac{\Delta\text{Oxy}'(t) - \mu_{\Delta\text{Oxy}'(t)}}{\sigma_{\Delta\text{Oxy}'(t)}}$$

ここで、 μ は $\Delta\text{Oxy}'(t)$ の加算平均、 σ は標準偏差を示す。

NIRS 信号は Oxy-Hb 濃度変化と部分実行光路長の積を示し、被験者間やチャンネル間では光路長が変化するため、直接計測値を比較することは好ましくない。それらの比較を可能にするために Z-score 化をおこなう^{[23][34]}。

4.3.4 線形成分除去

各セットにおいて、時系列変化のうち線形成分の除去をおこなう。タスク開始から次のセットのタスク開始直前までの 80 秒間の濃度変化について、線形近似をとり、その傾きを次式により取り除く (図 9 参照)。

$$\text{Z-score}'(t) = \text{Z-score}(t) - m_n(t - t_n)$$

ここで、 m_n は n セット目の近似直線の傾き、 t_n は n セット目のタスク開始時刻を示す。

本実験では、タスク時の温熱刺激でのみ脳活動が生じると仮定している。しかし、実際にはレスト時など刺激以外の要素でも NIRS 信号は変動していると考えられる。したがって、80 秒間の線形変化を刺激以外の反応と仮定して、その傾きを除去することで線形成分の影響を取り除く。処理後のデータ (Z-score') は温熱刺激による反応のみを反映しているとする。

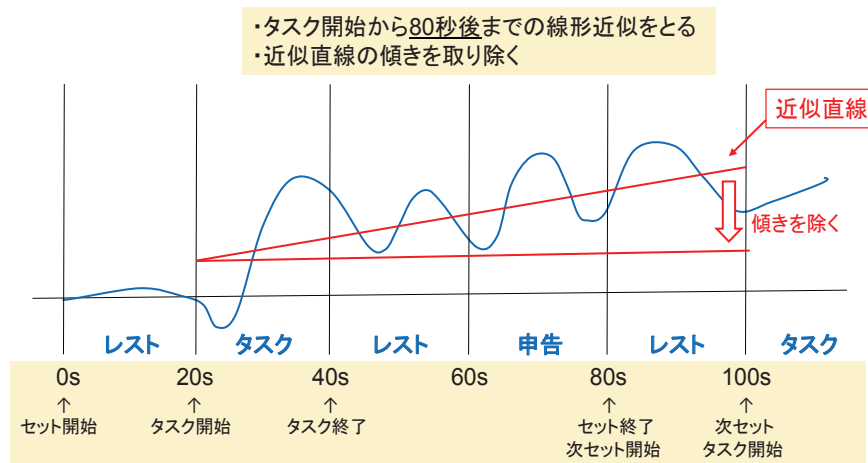


図 9 線形成分除去の概要

4.4 評価方法

4.4.1 差分評価

処理をしたデータ（Z-score'）は時系列変化を示すものだが、定量的な評価をおこなうために、データを加工して評価をおこなう。タスク後（After）とタスク前（Before）の差分（ $\Delta Z\text{-score}'$ ）を温熱刺激による脳活動量として次式で定義する。

$$\Delta Z\text{-score}' = Ave. (Z\text{-score}')_{\text{After}} - Ave. (Z\text{-score}')_{\text{Before}}$$

After：タスク終了時、タスク期間の 15～20 秒の 5 秒間を示す。

Before：タスク直前、各セット 1 回目レスト期間の 15～20 秒の 5 秒間を示す。

本実験の NIRS 計測の結果は、タスク期間の差分（ $\Delta Z\text{-score}'$ ）を用いて評価する。 $\Delta Z\text{-score}'$ は NIRS 信号値を標準化した値のため、単位は無次元である。したがって、以後、 $\Delta Z\text{-score}'$ の単位表記は省略している。

4.4.2 有意性評価

$\Delta Z\text{-score}'$ の結果の有意性について、(1) t 検定、(2) 分散分析を用いて評価する。

(1) t 検定（差分の有意性について）

帰無仮説： $\Delta Z\text{-score}' = 0$ 、対立仮説： $\Delta Z\text{-score}' \neq 0$ 、 $p < 0.05$ の両側検定をおこなう。刺激の前後で有意な脳活動量がみられるかを判定する。各被験者の $\Delta Z\text{-score}'$ の平均値について、各チャンネル、各セット分おこなう。

(2) 分散分析（温度間の有意差）

$\Delta Z\text{-score}'$ の結果について、刺激温度による違いで有意差が生じるかを、一元配置の分散分析（ $p < 0.05$ ）で判定する。一回の実験で各刺激温度について 3 セット（プロトコルによっては 6 セット）おこなっているが、セットごとには区別せず 3 セット分まとめて分散分析をおこなう。

4.4.3 申告結果との相関

温熱刺激に対しての、脳活動量（ $\Delta Z\text{-score}'$ ）と申告スコア（温冷感・快適感）の関係を示す。縦軸を $\Delta Z\text{-score}'$ 、横軸を申告スコアとして散布図を用いる。両者の相関について、線形近似をとって当てはまりを確かめる。相関の有意性も同時に評価する。ともに有意性を $p < 0.05$ で評価する。

4.5 結果

4.5.1 温刺激に対する反応

温刺激実験における、被験者 A の額右側のチャンネルの差分平均の結果を図 10(a) に示す。誤差が大きく、温刺激に対して正の反応とはならなかった。温冷感申告との相関結果は図 10(b) となったが、これも有意な相関とはならなかった。これは快適感との相関でも同様だった。他のチャンネル、他の被験者でも同様の結果が確認された。以上より、NIRS による温刺激への反応の計測は難しいと考えられる。温感を感じる皮膚の温点の分布密度は、冷点など他の感覚点よりも小さいので、脳信号が弱く NIRS にうまく反映されなかったというのが一つの原因として考えられる。

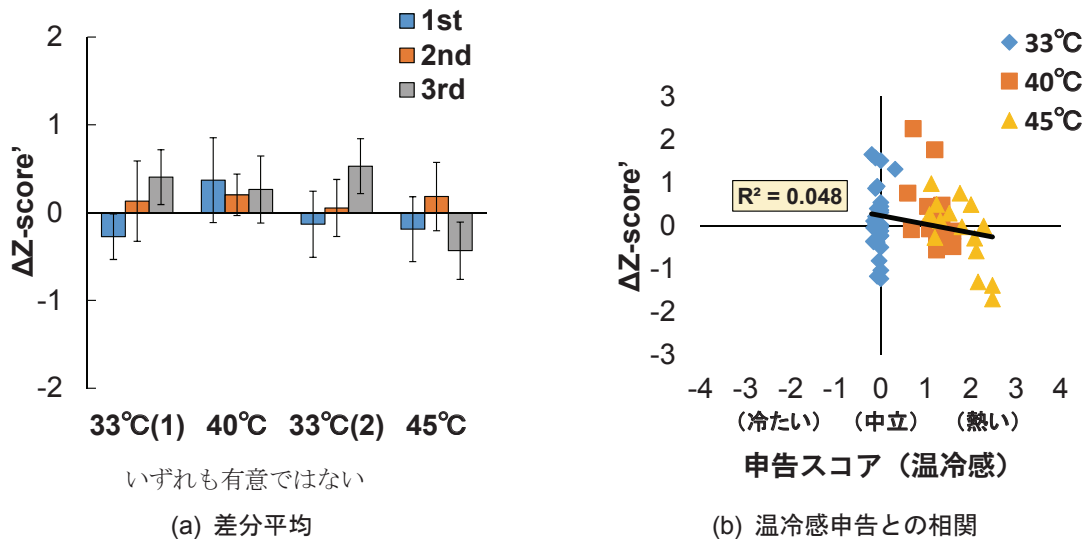


図 10 温刺激に対する反応

4.5.2 冷刺激に対する反応

冷刺激実験における、被験者 C の額左側のチャンネルの差分平均の結果を図 11(a) に示す。冷刺激に対して負に有意の反応となった。温冷感申告との相関結果は図 11(b) となり、有意な正の相関となった。申告との正の相関は後頭を含めた広範囲のチャンネルで確認された。被験者別の温冷感申告との相関結果が図 12 となるが、ほぼ全員で有意な正の相関が確認された。快適感との相関も温冷感と同様に有意な正の相関が確認された。以上の結果から、冷刺激に対しては額左側で負の反応となった。また、申告結果との間に有意な正の相関が示されたので、NIRS で冷刺激への反応を計測できると考えられる。

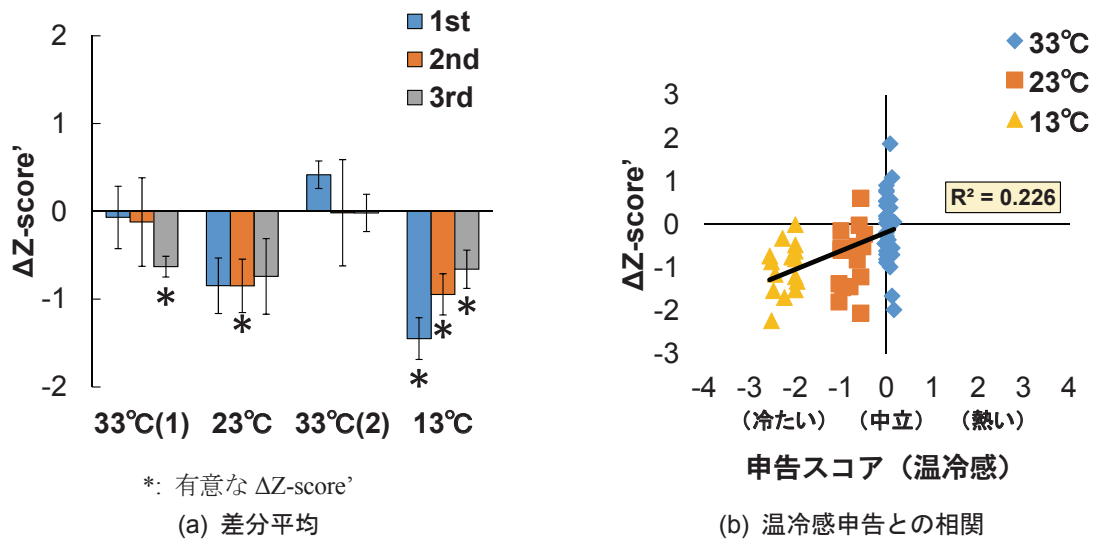


図 11 冷刺激に対する反応

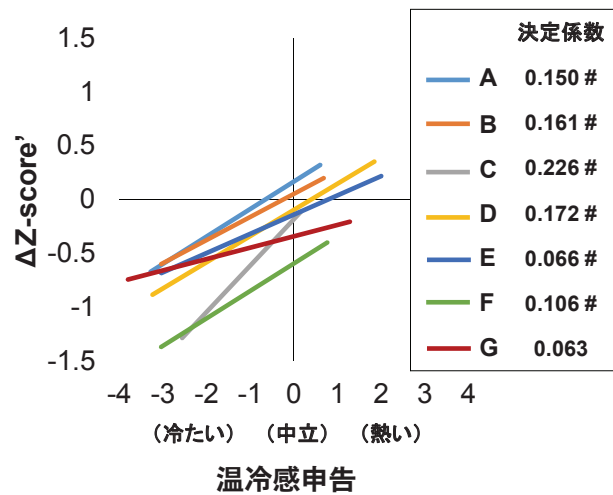


図 12 被験者別温冷感申告との相関（冷刺激）

4.5.3 計測結果のばらつき

図 10(a)や図 11(a)から、同じ温度に対して、申告スコアにはほとんど差はない。一方、 ΔZ -score'には大きなばらつきが存在することがわかる。したがって、個人間だけではなく、同一個人内でも NIRS 計測に計測値のばらつきが生じているといえる。しかし、冷刺激に対して有意な正の相関が確認できているので、試行数を増やしていくことで誤差の影響は小さくできると考えられる。

4.6 考察

本実験では、温熱刺激を与えたときの脳活動を NIRS によって計測することにより、温熱感覚の客観的評価を試みた。その結果、温刺激に関しては、NIRS 計測値は温熱感覚との相関が見られなかった。しかし冷刺激に対しては脳血流の低下が計測され、NIRS 計測値が申告結果との有意な正の相関を持つことを確認できた。したがって、冷感については NIRS で評価することが可能であるといえる。しかし、計測誤差が大きいので、試行数を増やして検討していくことが必要

である。また、温刺激に対しても温度や刺激位置を変えるなど、再度計測し直す必要がある。

局所温熱感覚に関わる脳の活動位置や反応傾向を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思われる。

5. 今後の展望

最終的に、NIRS 計測によって脳活動と温熱感覚の関係を明らかにできた場合、その結果は、個別の温熱感覚に応じた空調の自動制御に応用していくことができる（図 13 参照）。NIRS 計測で分かる脳血流変化と空調をリンクさせておき、空調利用者の脳血流が一番快適な状態になるように、空調を自動調節することで、脳活動を用いた快適状態の実現が可能となる。もしくは、温熱感覚との関係から、空調利用者の本来の快適状態の室温/室内状態が明らかになり、事前に登録しておいてそれに合わせて空調の調節をおこなう。

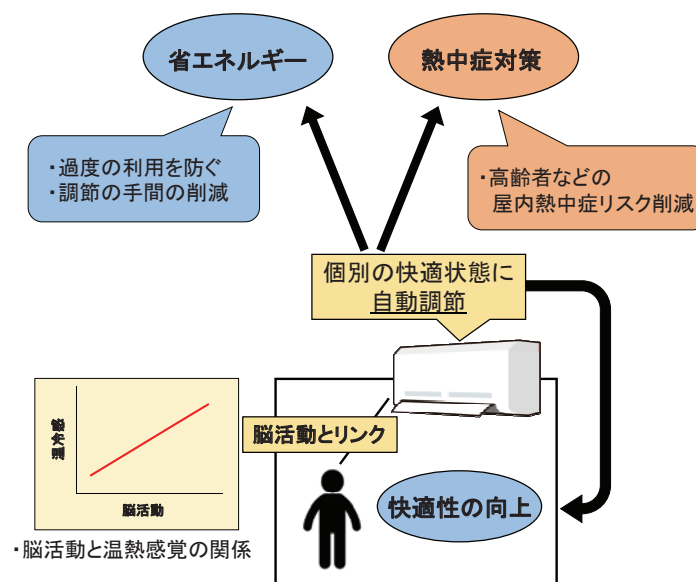


図 13 研究結果の将来的な応用イメージ

脳活動に基づいて空調を自動調節して最適状態にできることで、省エネルギーにつながると考えられる。冷暖房が過度にされている場合に最適化によってその分のエネルギー削減が可能となる。利用者自身の手による調節だと、手間になって細かい調節はおこなわれな可能性もあるが、自動調節の場合は使う側の負担にはならない。もし脳活動から判断して、従来の設定よりエネルギーを使う側への温度調節が必要になる場合は、利用者の選択によって自動調節をおこなわなくてもよい。ただし、タスク・アンビエントシステムの利用があれば、個別の調節も最小限のエネルギー消費でおこなうことができる。

また、空調の自動調節は、屋内の熱中症対策にもつながると考えられる。特に高齢者は温熱感覚が弱く、自覚がなく屋内で熱中症にかかる可能性が高い^{[35]~[38]}。そういった人々が、暑いと気付かず冷房を点けない/弱く設定している場合に、空調が自動で調節してくれることで、熱中症被害を減らすことにつながると考えられる。

参考文献

- [1] 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第 18 回研究成果発表会要旨集. NPO 法人バイオクリマ研究会ウェブサイト. 2015. http://www.bio-clima.net/event/pdf/bcrc18th_20150314_youshi.pdf, アクセス日 2016 年 2 月 29 日.
- [2] 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 回全国大会予稿集, pp.90-91, 2015.
- [3] 畑智也. 近赤外分光法を用いた脳活動計測による温熱感覚の客観的評価の試み. 東京大学修士論文, 2016.
- [4] 資源エネルギー庁. 平成 26 年度エネルギーに関する年次報告. エネルギー白書 2015, 2015.
- [5] 堀祐治, 伊藤直明, 須永修通, 室恵子. 不均一熱環境における熱的快適性の評価に関する研究 - 床面温度が熱的快適性に及ぼす影響と局部温冷感による熱的快適性予測について -. 日本建築学会計画系論文集, Vol.501, pp.37-44, 2006.
- [6] 柿本理恵, 田中稲子, 堀越哲美. 温熱環境指標 (SET*) の成立とその問題点. 日本建築学会東海支部研究報告集, Vol.44, pp.337-340, 2006.
- [7] 大熊涼子, 石野久彌, 中山哲士. 夏期のオフィスにおける 28°C 空調の熱的快適性に関する研究. 日本建築学会環境系論文集, Vol.618, pp.31-36, 2007.
- [8] 空気調和・衛生工学会 (編). 新版 快適な温熱環境のメカニズム 豊かな生活空間をめざして. 2006.
- [9] Gagge AP, Stolwijk JAJ, Hardy JD. Comfort and thermal sensations and associated physiological responses at various ambient temperatures. *Environmental Research*, Vol.1, No.1, pp.1-20, 1967.
- [10] 後藤昇, 後藤潤. 脳機能局在. リハビリテーション医学, Vol.38, No.4, pp.296-302, 2001.
- [11] 内藤栄一. 体性感覚のイメージング. 神経研究の進歩, Vol.48, No.2, pp.249-260, 2004.
- [12] 岡本泰昌, 小野田慶一. ストレスを感じる前頭前野 - ストレス適応破綻の脳内機構 -. 日本薬理学雑誌, Vol.126, No.3, pp.194-198, 2005.
- [13] 精山明敏, 関淳二. fMRI と NIRS の同時計測. 酒谷薫他, NIRS - 基礎と臨床 -, 新興医学出版社, pp.97-102, 2012.
- [14] 石澤友和, 水谷国男. 知的生産性と人体生理反応を考慮した空調システムに関する研究 (その 1): 脳波を利用した環境評価の可能性に関する検討. 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp.579-580, 2010.
- [15] 石澤友和, 水谷国男, 半田港. 人体生理・心理状態の違いを考慮した空調システムに関する研究: その 2 温熱環境の変化が脳波に与える影響に関する検討. 空気調和・衛生工学会大会学術講演会論文集, 平成 22 年 (2), pp.1467-1470, 2010.
- [16] Yao Y, Lian Z, Liu W, Jiang C, Liu Y, Lu H. Heart rate variation and electroencephalograph - the potential physiological factors for thermal comfort study. *Indoor Air*, Vol.19, No.2, pp.93-101, 2009.
- [17] Becerra LR, Breiter HC, Stojanovic M, Fishman S, Edwards A, Comite AR, Gonzalez RG, Borsook D. Human brain activation under controlled thermal stimulation and habituation to noxious heat: an fMRI study. *Magnetic Resonance in Medicine* Vol.41, No.5, pp.1044-1057, 1999.
- [18] Brooks JC, Zambreau L, Godinez A, Craig AD, Tracey I. Somatotopic organisation of the human insula to painful heat studied with high resolution functional imaging. *Neuroimage*, Vol.27, No.1, pp.201-209, 2005.
- [19] Rolls ET, Grabenhorst F, Parris BA. Warm pleasant feeling in the brain. *NeuroImage* Vol.41, pp.1504-1513, 2008.
- [20] Obrig H, Wenzel R, Kohl M, Horst S, Wobst P, Steinbrink J, Thomas F, Villringer A. Near-infrared

- spectroscopy: does it function in functional activation studies of the adult brain? *International Journal of Psychophysiology*, Vol.35, pp.125-142, 2000.
- [21] Miyazawa T, Horiuchi M, Komine H, Sugawara J, Fadel PJ, Ogoh S. Skin blood flow influences cerebral oxygenation measured by near-infrared spectroscopy during dynamic exercise. *European Journal of Applied Physiology*, Vol.113, No.11, pp.2841-2848, 2013.
- [22] Tanabe S, Nishihara N, Haneda M. Indoor temperature, productivity, and fatigue in office tasks. *HVAC&R Research*, Vol.13, No.4, pp.623-633, 2007.
- [23] 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 C 編*, Vol.79, No.807, pp.4075-4083, 2013.
- [24] 小林今日子, 安部聡子, 浅野和仁. 脳神経活動におよぼす下肢の温熱刺激と匂い刺激の効果. *昭和大学保健医療学雑誌*, Vol.12, pp.73-89, 2014.
- [25] Jöbsis FF. Noninvasive, infrared monitoring of cerebral and myocardial oxygen sufficiency and circulatory parameters. *Science*, Vol.23, No.198, pp.1264-1267, 1977.
- [26] Villringer A, Chance B. Non-invasive optical spectroscopy and imaging of human brain function. *Trends in Neurosciences*, Vol.20, pp.435-442, 1997.
- [27] Watanabe E, Maki A, Kawaguchi F, Takashiro K, Yamashita Y, Koizumi H, Mayanagi Y. Non-invasive assessment of language dominance with near-infrared spectroscopic mapping. *Neuroscience Letters*, Vol.256, pp.49-52, 1998.
- [28] 滝沢龍, 福田正人. 精神疾患の臨床検査としての光トポグラフィ検査 (NIRS) — 先進医療「うつ症状の鑑別診断補助」 —. *Medix*, Vol.53, pp.30-35, 2010.
- [29] Koseki S, Noda T, Yokoyama S, Kunisato Y, Ito D, Suyama H, Matsuda T, Sugimura Y, Ishihara N, Shimizu Y, Nakazawa K, Yoshida S, Arima K, Suzuki S. The relationship between positive and negative automatic thought and activity in the prefrontal and temporal cortices: A multi-channel near-infrared spectroscopy (NIRS) study. *Journal of Affective Disorders*, Vol.51, No.1, pp.352-359, 2013.
- [30] 酒谷薫. NIRS の測定原理. 酒谷薫(監), 岡田英史他(編). *NIRS — 基礎と臨床 —*, 新興医学出版社, pp.3-5, 2012.
- [31] 島津製作所. 製品情報: LABNIRS(ラボニルス) ▶ 原理と仕組み. 島津製作所ウェブサイト. 2015. <http://www.an.shimadzu.co.jp/bio/nirs/nirs2.htm>, アクセス日 2015 年 12 月 22 日.
- [32] Hoshi Y, Kobayashi N, Tamura M. Interpretation of near-infrared spectroscopy signals: a study with a newly developed perfused rat brain model. *Journal of Applied Physiology* 90:1657-1662, 2001.
- [33] 福田正人. 精神疾患の診断・治療のための臨床検査としての NIRS 測定. *Medix*, Vol.36, pp.4-10, 2003.
- [34] 野澤孝之, 近藤敏之. NIRS 脳計測データのオンライン分析のためのアーティファクト除去手法の比較. 第 24 回生体・生理工学シンポジウム講演資料集, pp.381-384, 2009.
- [35] Collins KJ, Exton-Smith AN, Dore C. Urban hypothermia: preferred temperature and thermal perception in old age. *British Medical Journal (Clinical Research Ed.)* Vol.282, pp.175-177, 1981.
- [36] Natsume K, Ogawa T, Sugeno J, Ohnishi N, Imai K. Preferred ambient temperature for old and young men in summer and winter. *International Journal of Biometeorology* Vol.36, pp.1-4, 1992.
- [37] Taylor NA, Allsopp NK, Parkes DG. Preferred room temperature of young vs aged males: the influence of thermal sensation, thermal comfort, and affect. *Journals of Gerontology Series A: Biological and Medical Sciences*, Vol.50, pp.216-221, 1995.
- [38] Guergova S, Dufour A. Thermal sensitivity in the elderly: A review. *Ageing Research Reviews*, Vol.10, No.1, pp.80-92, 2011.

低炭素社会の実現に向けた
技術および経済・社会の定量的シナリオに基づく
イノベーション政策立案のための提案書

社会システム編

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

平成 28 年 3 月

**Assessment of Thermal Sensation by Brain Activity Measurement
for Implementation of Energy-saving Air Conditioning**
Strategy for Social System,
Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action
toward Low Carbon Societies,
Center for Low Carbon Society Strategy,
Japan Science and Technology Agency,
2016.3

国立研究開発法人科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター

本提案書に関するお問い合わせ先

- 提案内容について・・・低炭素社会戦略センター 特任研究員 井原 智彦 (Tomohiko IHARA)
特任研究員 吉田 好邦 (Yoshikuni YOSHIDA)
- 低炭素社会戦略センターの取り組みについて・・・低炭素社会戦略センター 企画運営室

〒102-8666 東京都千代田区四番町5-3 サイエンスプラザ4階
TEL : 03-6272-9270 FAX : 03-6272-9273 E-mail : lcs@jst.go.jp
<https://www.jst.go.jp/lcs/>

© 2016 JST/LCS

許可無く複写・複製することを禁じます。
引用を行う際は、必ず出典を記述願います。
