

原著論文

## 近赤外分光法を用いたウエストベルトによる被服圧下における脳活動計測

上前 真弓\*, 上前 知洋\*\*, 上條 正義\*, 井上 正雄\*\*\*

\* 信州大学, \*\* 長野県, \*\*\* 株式会社島津製作所

### Measurement of Brain Activity under Clothing Pressure by Waist Belt Using Near-Infrared Spectroscopy

Mayumi UEMAE\*, Tomohiro UEMAE\*\*, Masayoshi KAMIJO\* and Masao INOUE\*\*\*

\* Shinshu University, 3-15-1 Tokida, Ueda City, Nagano 386-8567, Japan

\*\* Nagano Prefectural Office, 692-2 Habashita Minaminagano, Nagano City, Nagano 380-8570, Japan

\*\*\* Shimadzu Corporation, 1 Nishinokyo Kuwabara-cho, Nakagyo-ku, Kyoto 604-8511, Japan

**Abstract :** We detected the cerebral activity region under clothing pressure by a waist belt using near-infrared spectroscopy as basic research in order to create a method for evaluation of clothing comfort. The measured items were near-infrared spectroscopy, electrocardiogram, finger skin blood flow and sensory test. As a result, the clothing pressure on the abdomen activated the following brain activity areas: “the prefrontal area”, “the lateral sulcus side area traversing the premotor area, motor area and somatosensory area” and “the parietal area across the motor area and somatosensory area”. In the somatotopic map of the postcentral gyrus by Penfield and Rasmussen, trunk sensations are located near the parietal region and intra-abdominal sensations are located near the lateral sulcus. It is presumed that the results of this experiment correspond to the somatotopic map. These results are useful to evaluate the influence that clothing pressure imparts to brain activity.

**Keywords :** Clothing pressure, Brain activity, Near-infrared spectroscopy

## 1. はじめに

着心地に関わる要因の一つに被服圧がある。被服圧は、被服を身に着けた際に発生する人体を圧迫する力であり、被服のずり下がりやずり上りを防ぐフープテンションによるもの、肩や腰にかかる被服の重量によるもの、動作に伴う皮膚の伸縮によるものなど様々な状況で発生する。

適度な被服圧は、むくみやリンパ浮腫の予防、姿勢補整、運動機能のサポートに役立ち、機能性衣料の一種としてコンプレッションウェアが多く開発されている。一方、過度な被服圧は、血流障害や消化器の機能低下など健康障害を引き起こす原因にもなる。着心地は被服と人間が関わってはじめて発現する感覚であり、着心地を評価する上で、被服圧が人体に与える影響を調査することは重要である。

これまで被服圧が人体に与える影響として、心拍変動 [1-3]、皮膚温変化 [4, 5]、血流変化 [6-8]、内臓の変位変形 [9]、唾液分泌量の変化 [10]、 $\alpha$  波出現率の変化 [2, 11]、体性感覚誘発電位の変化 [12] など様々な報告がされている。それらの研究のほとんどは、自律神経系に対するアプローチである。被服圧が中枢神経系に与える影響に関する研究は未だ少なく、脳活動を多チャンネルで広範囲にわたり計測し、その局在性について調査した事例は希少である。また、近赤外分光法 (NIRS: Near-infrared spectroscopy) による脳血流動態の計測から着心地を評価した研究も少ない。脳波は神経の情報伝達に伴う電氣的活動を計測するものであるのに対し、

NIRSは脳活動を支えるエネルギー供給をヘモグロビンの変化量から計測するものである。

本研究は、被服圧に対する着心地評価手法を構築するための基礎研究という観点から、腹部への被服圧が中枢神経系に与える影響およびその脳活動部位を、NIRSによる脳血流動態の計測から調査することを目的とする。本稿では、腹部への被服圧に対する着心地評価における、脳活動の計測に適した部位を大局的に把握することを目的とする。また、被服圧が人体に与える影響を多方面から総合的に評価するために、NIRSを用いた中枢神経系への評価だけではなく、これまで研究実績のある自律神経活動からの評価(心電図, 皮膚血流)と自覚の程度に対する評価(官能検査)も行った。

なお、本研究は信州大学ヒトを対象とした研究に関する倫理委員会に承認された上で実施された。

## 2. 実験方法

測定項目はNIRS、心電図、皮膚血流、官能検査とし、被験者は健康な成人10名(男性5名[年齢 $30 \pm 11$ 歳、胴囲 $82.6 \pm 12.1$ cm, BMI $23.6 \pm 3.9$ ]、女性5名[年齢 $35 \pm 13$ 歳、胴囲 $69.4 \pm 4.3$ cm, BMI $21.7 \pm 1.9$ ])であった。被験者は基本着衣を下着・Tシャツ・ハーフパンツとした。実験室の温湿度条件は、温熱中立環境の $25^{\circ}\text{C}$ 、60%R.H.とした。

実験の条件として設定した被服圧は、日常生活における圧迫を想定し、幅4cmの非伸縮性のウエストベルトを用いて腹部を圧迫した。被験者全員がきついと自覚する圧迫条件とし

て堀場ら [11] や筆者ら [13, 14] の先行研究を参考に、被験者の胴囲に対してベルト長を 10% 短くする条件を採用した。

実験プロトコルを図1に示す。安静20秒間、圧迫120秒間、再安静20秒間を1セットとしてこれを3セット繰り返して行った。実験は図2に示すように、着座姿勢で圧迫部位を見ることなく実験室壁面の固視点を見ている状態でを行った。

NIRSの計測には、LABNIRS（株式会社島津製作所製）を使用した。近赤外光の照射・受光プローブが、3cm間隔に配された全頭用ホルダを用い、図3に示す合計57チャンネルで計測した。国際標準10-20電極配置法によるCzの位置に35chを配するようプローブを装着した。データ採取間隔は45msとした。

NIRSの計測より得られた酸素化ヘモグロビン濃度変化量（ $\Delta$ Oxy-Hb: oxygenated hemoglobin）、脱酸素化ヘモグロビン濃度変化量（ $\Delta$ Deoxy-Hb: deoxygenated hemoglobin）、総ヘモグロビン濃度変化量（ $\Delta$ Total-Hb: total hemoglobin）のうち、 $\Delta$ Oxy-Hbは脳血流量の変化を示す最も感度の高い指標であるという報告 [15] から、本研究では $\Delta$ Oxy-Hbを解析対象とした。頭部に配置した照射・受光プローブから得られる $\Delta$ Oxy-Hbの3セット分のデータを各チャンネルで加算平均し、0.1Hzのローパスフィルタをかけ、安静状態の2秒後から5秒後までの3秒間の平均値を0とする基準化を行った。安静状態の5秒後から10秒後までの平均値と、圧迫状態120秒間に対して5秒間毎の平均値を算出した。これらの差異を確認するため、統計解析としてエクセル統計2010を用いてクラスカル・ウォリス検定を行った。多重比較には、Steelの両側検定を行った。有意水準は $p < 0.05$ とした。

また、本稿では脳活動を巨視的に捉え考察するために、これまでの脳科学の知見である機能局在論を参考に57チャンネルを領域毎に分けて同様の解析を行った。前頭前野、運動前野、運動野、体性感覚野、体性感覚連合野の領域における脳活動の傾向をつかむことを目的に、全57チャンネルを6領域：A、B、C、D、E、F（図4参照）に分け、領域毎にチャンネルの加算平均を求め上述と同様の解析を行った。領域Aは、前頭前野付近の [1ch, 2ch, 3ch, 4ch, 5ch, 6ch, 7ch, 8ch, 9ch, 10ch, 11ch, 12ch]、領域Bは、左半球の運動前野、運動野、体性感覚野の外側溝寄りの [13ch, 19ch, 26ch, 32ch, 39ch]、領域Cは、右半球の運動前野、運動野、体性感覚野の外側溝寄りの [18ch, 25ch, 31ch, 38ch, 44ch]、領域Dは、運動前野付近の [14ch, 15ch, 16ch, 17ch, 20ch, 21ch, 22ch, 23ch, 24ch]、領域Eは、運動野および体性感覚野付近の [27ch, 28ch, 29ch, 30ch, 33ch, 34ch, 35ch, 36ch, 37ch, 40ch, 41ch, 42ch, 43ch]、領域Fは、体性感覚連合野付近の [45ch, 46ch, 47ch, 48ch, 49ch, 50ch, 51ch, 52ch, 53ch, 54ch, 55ch, 56ch, 57ch] とした。

心電図（ECG100C, MP150/ BIOPAC SYSTEMS 社製）は胸部双極誘導によって導出された。皮膚血流はレーザードップラー血流計（LDF100C, MP150/ BIOPAC SYSTEMS 社製）を用いて左手第二指末節にセンサを装着して計測した。

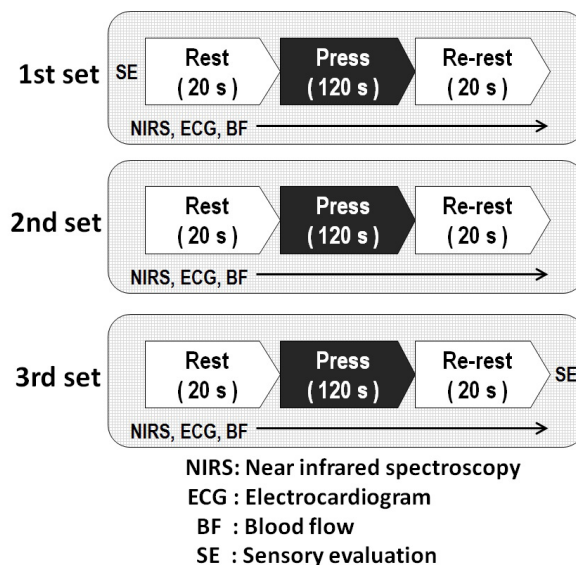


図1 実験プロトコル

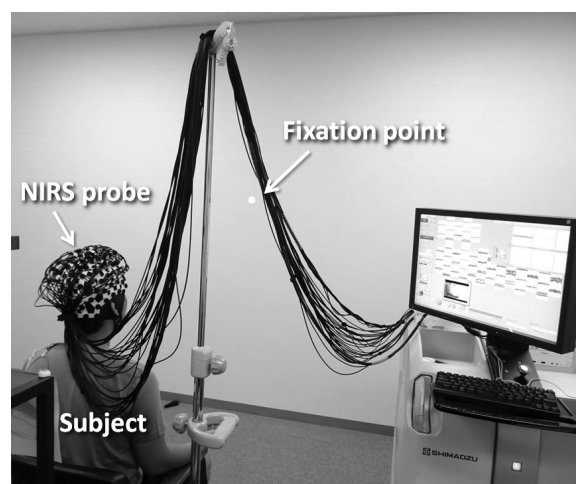


図2 実験の様子

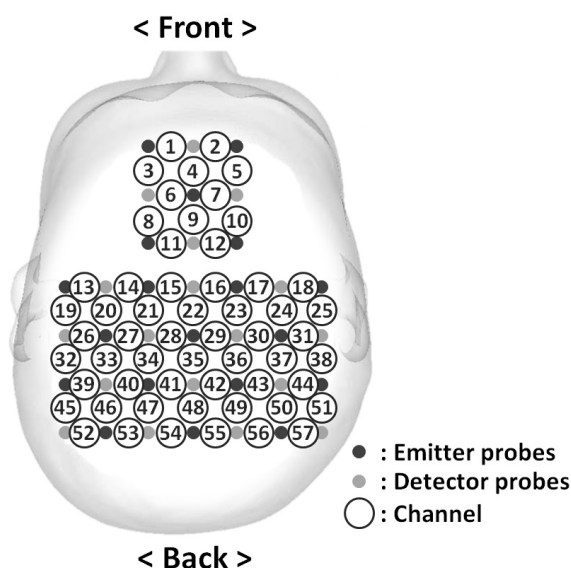


図3 頭上から見たNIRSプローブ装着部位

## 近赤外分光法を用いたウエストベルトによる被服圧下における脳活動計測

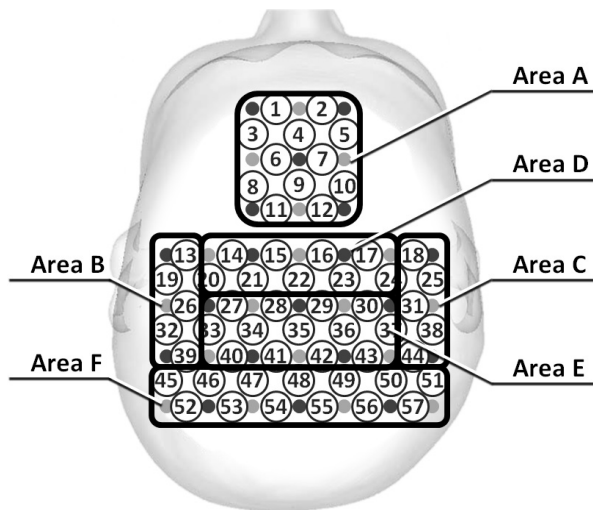


図4 NIRS計測チャンネルの統合領域

心電図、皮膚血流ともにサンプリング周波数は2000Hzとし、計測の制御およびデータの取り込みはノート型コンピュータを用い、データ採取ツール (Acqknowledge/ BIOPAC SYSTEMS 社製) で行った。

心電図は、得られた波形からR波のピーク検出を行い、R-R間隔を求めた。そのR-R間隔から瞬時心拍数を求めた。安静20秒間、圧迫120秒間について3セット分の平均値を算出した。皮膚血流は、安静20秒間、圧迫120秒間について3セット分の平均値を算出した。

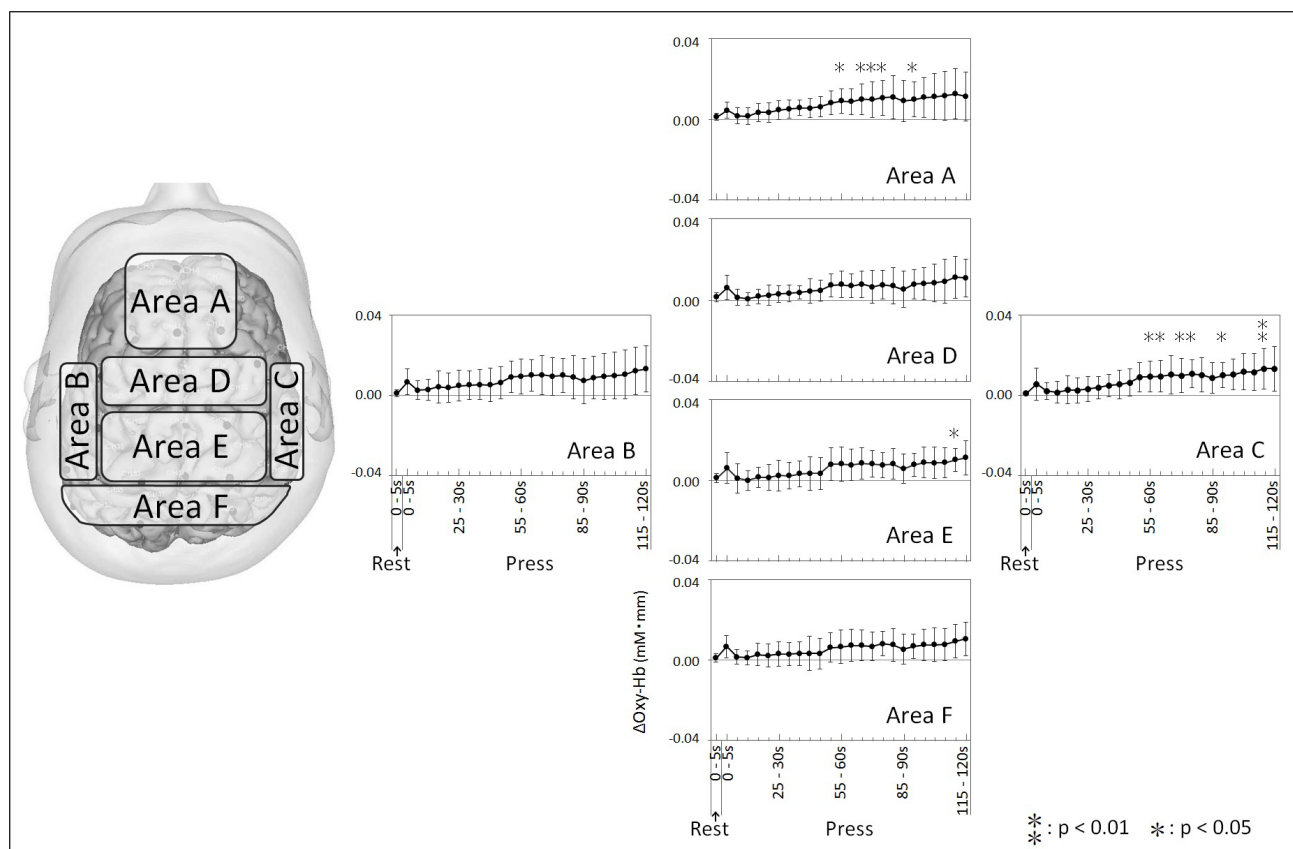
官能検査は、腹部の快適感（快適－不快）、腹部の圧迫感（圧迫感がある－圧迫感がない）、覚醒感（眠くない－眠い）について、「非常に・とても・やや・どちらともいえない」の7段階評価（+3－-3）で実施した。実験開始直前に安静状態について、実験終了直後に圧迫状態について調査した。

心電図、皮膚血流、官能検査の統計解析は、対応のあるt検定により安静時と圧迫時の有意差検定を行った。有意水準は $p < 0.05$ （両側検定）とした。

## 3. 結果

NIRSの計測より得られた全57チャンネル分の $\Delta\text{Oxy-Hb}$ の解析結果を図5に示す。男性被験者1名の30chが測定エラーであったため除外し、30chは9名分、その他は10名分の平均値である。34ch、36chでは標準偏差が他のチャンネルに比べて大きい。これは個人差を反映したものである。太枠で記した2ch、3ch、6ch、8ch、9ch、24ch、25ch、26ch、27ch、31ch、38ch、42ch、43ch、44ch、51chにおいて、 $\Delta\text{Oxy-Hb}$ の値は安静時に比べ圧迫時に有意な増加が認められた。

前頭前野、運動前野、運動野、体性感覚野、体性感覚連合野の領域における脳活動の傾向をつかむために、全57チャンネルを6領域：A、B、C、D、E、Fに分け、領域毎にチャンネルの加算平均を求めた結果を図6に示す。領域A、C、Eにおいて、 $\Delta\text{Oxy-Hb}$ の値は安静時に比べ圧迫時に有意な増加が認められた。

図6 NIRSによる $\Delta\text{Oxy-Hb}$ の結果（領域毎）

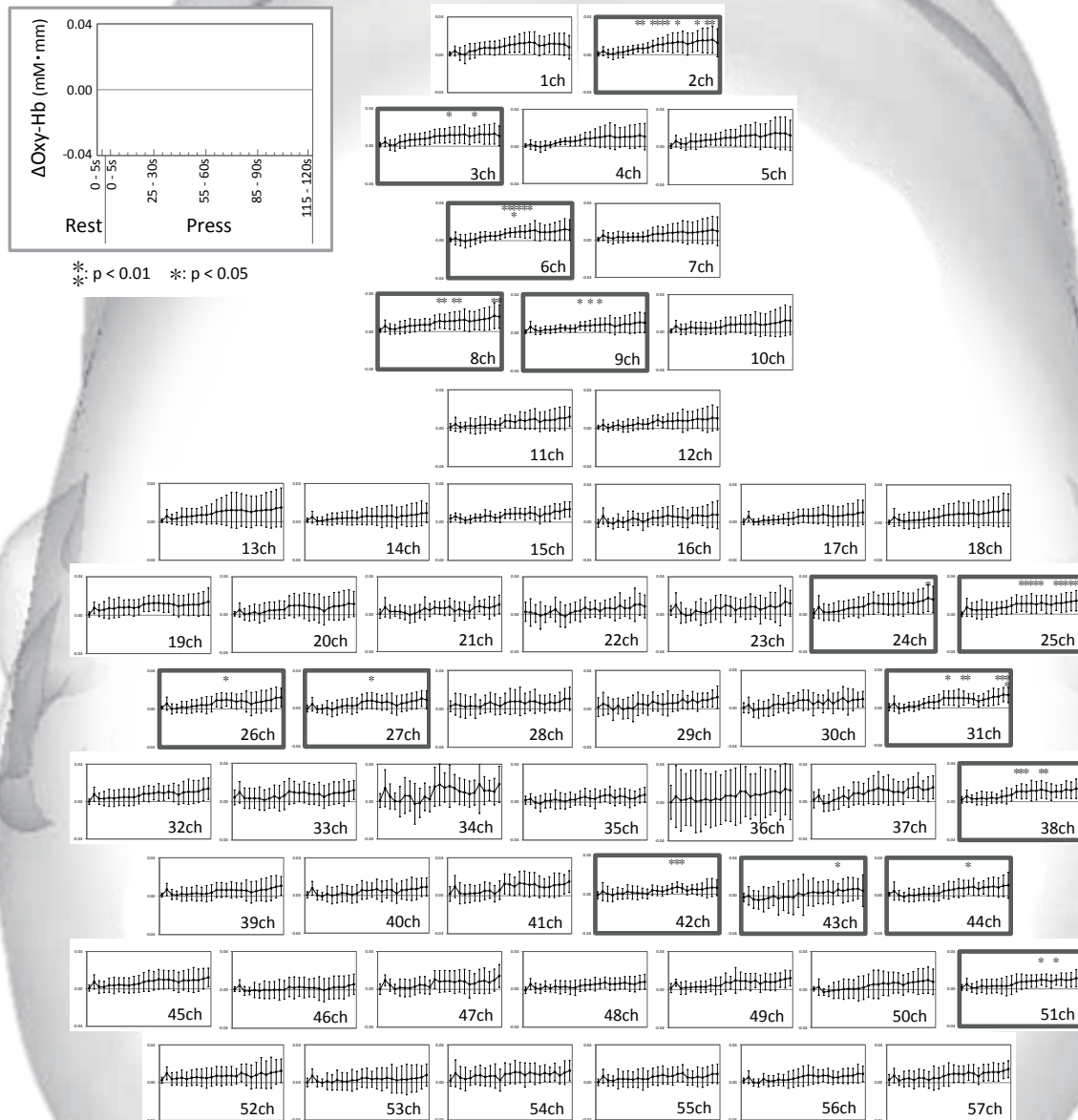


図5 NIRSによる $\Delta\text{Oxy-Hb}$ の結果 (全57チャンネル)



## 近赤外分光法を用いたウエストベルトによる被服圧下における脳活動計測

今回の実験における $\Delta\text{Oxy-Hb}$ の有意な変化が見られた部位は、脳の右半球と左半球において全て左右対称という結果ではなかった。脳の右半球と左半球の違いについて、脳の神経線維をつなぐシナプスのタンパク質分子レベルでの構造的非対称性[16]、自律神経系制御に関わる大脳偏側性[17]、情動に対する大脳賦活パターンの偏側性[18]などの報告がある。本実験においても、腹部への圧迫刺激に対する何らかの脳の偏側性があらわれた可能性があるが、今回の結果に対する右半球と左半球の偏側性の言及は、今後の脳科学の解明を待って慎重に行いたいと考える。

図7に瞬時心拍数の結果を、図8に左手第二指末節で計測した皮膚血流の結果を示す。ウエストベルトによる腹部圧迫が加わることで、瞬時心拍数は有意に減少し、皮膚血流は有意に増加した。瞬時心拍数が減少し、末梢皮膚血流が増加したことから、腹部への被服圧が副交感神経活動優位な状態にさせたと考えられる。この自律神経活動の反応は先行研究[3, 13, 14]と一致するものであり、腹部に被服圧が加わった場合に見られ、動脈圧受容器反射による反射性循環調節が行われたために副交感神経活動に亢進したと推察される。

図9に快適感、圧迫感、覚醒感について調査した官能検査の結果を示す。圧迫時の評価は安静時の評価に比べ、快適感が有意に減少し、圧迫感、覚醒感が増加した。このことから被験者が、ウエストベルトによる被服圧を不快かつ圧迫感があると知覚していたことがわかる。覚醒感については、有意な変化は認められなかった。

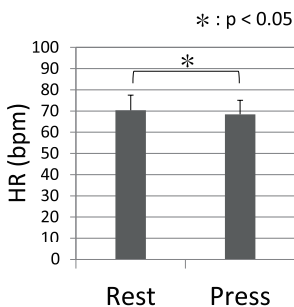


図7 瞬時心拍数

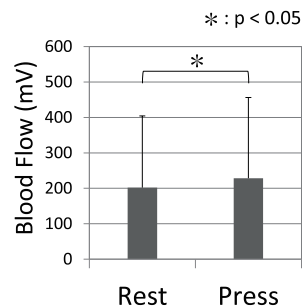


図8 皮膚血流

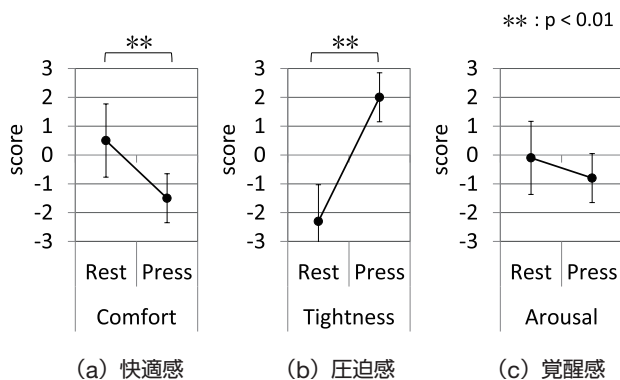


図9 官能検査

## 4. 考 察

瞬時心拍数、皮膚血流、官能検査の結果を踏まえた上で、NIRS計測における領域A、C、Eの有意な賦活について考察する。

まず領域Cは、運動前野、運動野、体性感覚野の外側溝寄り付近であり、PenfieldとRasmussenによる感覚野の体部位局在によると体性感覚野の外側溝寄りの部分は腹腔内の感覚に対応している。瞬時心拍数と皮膚血流の結果から圧受容器反射による循環調節が行われたと推定すると、弱い被服圧ではなく、腹部の表在感覚のみならず内臓への圧迫がかかったために、領域Cが有意に賦活した可能性がある。先行研究においても、骨格に保護されていない腹腔内臓は圧迫の影響を受けやすいことや[9]、皮下脂肪が分布している圧縮可能な部分に変形を生じやすい[19]という報告がある。また、大脳の島皮質は体性感覚野の下の部分と前頭葉、側頭葉に覆われている部分で、内臓感覚、内臓運動、嗅覚、味覚、触覚などの機能に関わっている[20]。NIRSの測定深度は、頭皮から20mm程度の深部までが対象となっているため、島皮質における賦活を計測できているかは明確ではないが、活動の一端が反映した計測結果であった可能性もある。

領域Aは、前頭前野付近であり、感情表出や行動遂行機能などの高次の認知機能に関わる部位である。官能検査の結果から、被験者が被服圧による不快感と圧迫感を知覚しており、その感情や行動抑制から $\Delta\text{Oxy-Hb}$ が有意に増加したのではないかと推察する。

領域Eは、運動野および体性感覚野付近であり、運動野は骨格筋の動きの制御に関わっており、体性感覚野は体性感覚からの入力を受ける部分である。感覚野の体部位局在によると、頭頂から下へ向かって、下肢、臀部、体幹、首、頭の順に体部位局在性があることから、腹部の表在感覚、深部感覚から入力された被服圧情報がこの領域で処理されたことによる反応と推察する。

外側溝寄りの運動前野、運動野、体性感覚野付近の領域Cは、頭頂を中心とした運動野、体性感覚野付近の領域Eよりも圧迫開始から短時間で $\Delta\text{Oxy-Hb}$ が有意に増加した。感覚野の体部位局在では、頭頂付近に体幹、外側溝寄りに腹腔内の感覚が配されている。今回の実験における圧迫条件は被験者全員がきついと自覚する比較的強い被服圧であったため、内臓感覚に対する反応がより強く出現したのではないかと考える。

## 5. お わ り に

本研究では、被服圧に対する着心地評価手法を構築するための基礎研究という観点から、被服圧が中枢神経系に与える影響および脳部位毎の活動を調査するためにNIRSを用いて多チャンネルで広く脳活動を計測した。

ウエストベルトによる腹部圧迫が中枢神経系に与える影響として、「前頭前野付近（領域A）」と「外側溝寄りの運動前

野，運動野，体性感覚野付近（領域C）」と「頭頂を中心とした運動野，体性感覚野付近（領域E）」の脳活動の賦活が確認された。これらの結果より被服圧に対する着心地評価において，脳活動の計測部位を決定する基礎データの一つが得られたと考える。

また，感覚野の体部位局在の腹腔内の感覚にあたる外側溝寄りの測定領域（領域C）は，体幹の感覚にあたる頭頂付近の測定領域（領域E）よりも，早く $\Delta\text{Oxy-Hb}$ が有意に増加した要因として，本実験における圧迫条件は被験者全員がきつくと自覚する比較的強い被服圧であったことによる可能性がある。それほど高くない被服圧に対しては，頭頂を中心とした領域の方が脳活動を捉えやすいことも考えられる。この点の検証については，本実験の結果の信頼性を高めるために引き続き被験者数を増やしデータの収集を行うことと併せて今後の課題としたい。

## 謝 辞

本研究は，文部科学省科学研究費補助金（基盤研究（B）No.25280099）の助成により行われた。また，実験にご協力頂きました実験参加者の皆様に感謝致します。

## 参 考 文 献

- [1] 諸岡晴美，中橋美幸，諸岡英雄，北村潔和：体幹部の圧迫が心拍数，血圧，皮膚血流量および呼吸機能に及ぼす影響，繊維機械学会誌，54(2)，pp.57-62，2001.
- [2] 杉田明子，岡部和代，木岡悦子：中高年女性におけるガードル着用効果と快適性－心拍数・皮膚温及び脳波の早期応答から－，繊維製品消費科学会誌，43(6)，pp.365-376，2002.
- [3] 石丸園子，中村美穂，野々村千里，横山敦士：人体への加圧部位の違いが心理・生理特性に及ぼす影響，人間工学，46(5)，pp.325-335，2010.
- [4] 三野たまき，後藤亮子，上田一夫：手の皮膚温に及ぼす腹部圧迫刺激の影響，繊維学会誌，54(10)，pp.555-561，1998.
- [5] 横井亮子，吉田美奈子，笹川栄子，平田耕造：ガードルの圧迫が身体に及ぼす影響について，繊維製品消費科学会誌，47(9)，pp.537-547，2006.
- [6] 川端博子，山本泉，酒井豊子，石川欣造：衣服の拘束性に関する研究－上腕圧迫時の血流および皮膚温への影響について－，日本家政学会誌，40(9)，pp.831-835，1989.
- [7] 川秀子，諸岡晴美，北村潔和，諸岡英雄：下肢各部の局所的圧迫が皮膚血流量に及ぼす影響－サポートパンティストッキングの設計指針を得るための試み－，繊維製品消費科学会誌，36(7)，pp.491-494，1995.
- [8] 中橋美幸，諸岡晴美，諸岡英雄：下腿部周径上の加圧割合が皮膚血流量に及ぼす影響，繊維製品消費科学会誌，39(6)，pp.392-397，1998.
- [9] 渡辺ミチ，田村照子：衣服圧が身体に及ぼす影響（第3報）－体幹部衣服圧と内臓の変位変形について－，家政学雑誌，27(1)，pp.44-50，1976.
- [10] 三野たまき，上田一夫：唾液分泌活動に及ぼす腹部圧迫刺激の影響－特に唾液分泌量の減少を引き起こす最小刺激圧について－，日本家政学会誌，49(10)，pp.1131-1138，1998.
- [11] Horiba, Y., Kamijo, M., Sadoyama, T., Shimizu, Y., Sasaki, K. and Shimizu, H.: Effect on Brain Activity of Clothing Pressure by Waist Belts, *Kansei Engineering International*, 2(1), pp.1-8, 2000.
- [12] 岡田宣子：衣服圧の生体に及ぼす影響－体性感覚誘発電位を指標として－，繊維製品消費科学，36(1)，pp.138-145，1995.
- [13] 上前真弓，上前知洋，上條正義：腹部への被服圧が心身に与える影響とその閉眼・開眼における比較，日本感性工学会論文誌，13(2)，pp.403-409，2014.
- [14] 上前真弓，上前知洋，上條正義，輝度変化による視覚刺激が腹部への被服圧に伴う生理反応に与える影響，日本感性工学会論文誌，13(3)，pp.479-484，2014.
- [15] Hoshi, Y., Kobayashi, N. and Tamura, M.: Interpretation of Near-infrared spectroscopy Signals: a Study with a Newly Developed Perfused Rat Brain Model, *the American Physiological Society*, 90, pp.1657-1662, 2001.
- [16] Kawakami, R., Shinohara, Y., Kato, Y., Sugiyama, H., Shigemoto, R. and Ito, I.: Asymmetrical Allocation of NMDA Receptor  $\epsilon$  2 Subunits in Hippocampal Circuitry, *Science*, 300(5621), pp.990-994, 2003.
- [17] Wittling, W., Block, A., Genzel, S. and Schweiger, E.: Hemisphere Asymmetry in Parasympathetic Control of the Heart, *Neuropsychologia*, 36(5), pp.461-468, 1998.
- [18] Davidson, R. J.: Anterior Cerebral Asymmetry and the Nature of Emotion, *Brain and Cognition*, 20(1), pp.125-151, 1992.
- [19] 岡田宣子：胴部圧迫時の衣服圧と圧迫感覚値との関係，繊維製品消費科学，36(1)，pp.146-153，1995.
- [20] Nagai, M., Kishi, K. and Kato, S.: Insular Cortex and Neuropsychiatric Disorders: a Review of Recent Literature, *European Psychiatry*, 22(6), pp.387-394, 2007.

近赤外分光法を用いたウエストベルトによる被服圧下における脳活動計測



**上前 真弓**（学生会員）

信州大学大学院工学系研究科修了。一般財団法人日本繊維製品品質技術センターに勤務し、繊維製品、生活用品の品質試験業務に従事。現在、信州大学大学院総合工学系研究科に所属し、着心地評価に関する研究を行っている。繊維学会会員。



**上前 知洋**（非会員）

2006年信州大学大学院工学系研究科修了。2010年信州大学大学院総合工学系研究科博士課程単位取得退学。同年、長野県庁に入庁。健康福祉や地域振興に関わる業務を担当後、現在は産業労働行政に従事。研究分野は感性

計測による着心地評価及び共創活動による感性価値創造について。



**上條 正義**（正会員）

1987年信州大学繊維学部繊維工学科卒業。1989年信州大学大学院繊維学研究科修士課程修了。1990年東京理科大学諏訪短期大学生産管理工学科助手。1996年信州大学繊維学部感性工学科助手。2001年同大、助教授。

2005年信州大学大学院総合工学系研究科助教授。2009年同大、教授。現在に至る。博士（工学）。感性工学における計測評価の研究に従事。IEEE、繊維学会、自動車技術会、照明学会、電子情報通信学会、計測自動制御学会、人間工学会 各会会員。



**井上 正雄**（非会員）

株式会社島津製作所 グローバルマーケティング部 シニアエキスパート。自然な状態で計測ができるfNIRSの特徴を生かして、脳科学研究において有用なデータを取得できるように、実験の条件から解析に至るサポート

を中心に活動を行なっている。脳機能の解明に役立つ道具として更なる進化を目指す。