

熱的快適性は脳活動から評価できるか？ ーブレインインターフェース型熱的快適性の 評価方法の開発を目指してー

早稲田大学 渡邊 裕 宣
(共同研究者) 杏林大学 渋谷 賢
早稲田大学 杉 泰 佑
同 永 島 計

Can Thermal Comfort be Evaluated from Brain Activity?

by

Hironori Watanabe, Kei Nagashima

*Institute for Energy and environmental system, Sustainable Energy & Environmental
Society Open Innovation Research Organization, Waseda University*

Satoshi Shibuya

*Department of Integrative Physiology,
School of Medicine, Kyorin University*

Taisuke Sugi

*Body Temperature and Fluid Laboratory,
Faculty of Human Sciences, Waseda University*

ABSTRACT

Human thermal perception is essential for adapting to environmental conditions and is divided into two main components: thermal sensation and thermal comfort. This research employed electroencephalogram measurement alongside dipole and event-related spectrum perturbation analysis to clarify the spatiotemporal patterns of brain activity associated with thermal perception. In Experiment 1, we analyzed brain

activity patterns associated with thermal sensation when exposed to localized cold and warm stimuli. Experiment 2 focused on brain activity patterns associated with thermal comfort, using a combination of whole-body and localized thermal stimuli. The results indicated that overlapping brain regions, such as the right anterior cingulate cortex, precuneus, and medial prefrontal cortex, were activated in response to thermal sensation, with distinct temporal activity patterns observed between cold and warm stimuli. Regarding thermal comfort, the anterior cingulate cortex, medial prefrontal cortex, and insular cortex were implicated, with unique spatiotemporal activity patterns distinguishing comfort from discomfort. These results indicate that thermal perception is processed through different neural oscillation patterns within distinct brain regions.

キーワード

熱知覚, 温冷感, 脳波, ダイポール解析, ERSP解析

Keyword

thermal perception, thermal sensation, EEG, dipole analysis, ERSP analysis

要 旨

ヒトの熱知覚は環境適応に重要な役割を果たしており、温冷感と熱的快適感の2要素に分類される。本研究では、脳波測定とダイポールおよび事象関連スペクトラム摂動解析を組み合わせて、熱知覚形成に関連する脳活動の時空間パターンを解明した。実験1では局所的な冷・温刺激による温冷感の脳活動パターンを、実験2では全身と局所の温熱刺激の組み合わせによる熱的快適感の脳活動パターンを検討した。その結果、温冷感では右前中心回、楔前部、内側前頭回などの重複する脳領域が活性化し、冷・温刺激間で異なる時間的活動パターンを示した。熱的快適感では、上前頭回、内側前頭回、前帯状回、島皮質などが関与し、快適・不快感で明確に異なる時空間活動パターンが観察された。これらの知見は、温熱知覚が特定の脳領域における異なる神経摂動パターンによって処理されることを示唆している。

1. 序 論

温度は生物機能に影響を与える要因であり、動物は恒常性維持のために内外の熱環境を意識的・無意識的に評価している。人間の意識的熱知覚は、接触物質の熱特性を推定する温冷感（判別要素）と、快・不快を判断する熱的快適感（快・不快要素）に分類される^{1,2)}。

温度感覚の神経メカニズムについては、機能的・解剖学的に分離された回路による処理（ラベルライン理論）と、皮質ニューロンでの連続的・段階的温度表現による処理という2つのモデルが提唱されている³⁻⁷⁾。fMRI研究では、前帯状皮質、島皮質、下頭頂葉が温度感覚に関与することが示されているが^{8,9)}、冷・温刺激の判別メカニズムは未解明である。

熱的快適感については、行動性体温調節の主要な駆動因子として機能するが、その神経基盤に関する知見は限られている。我々の先行研究では、

局所冷・温刺激と全身冷・温刺激の組み合わせにより、同じ局所刺激でも全身条件によって異なる主観的快適感が生じることを示した¹⁰⁾。しかし、fMRIの時間分解能の制限により、熱的快適感の形成に関連する動的な神経活動パターンは明らかになっていない。

EEG測定は、ミリ秒単位の時間分解能で神経活動の動的パターンを評価可能である。事象関連スペクトラム摂動(ERSP)解析により特定刺激に対する詳細な時間的活動が明らかになり、ダイポール解析の進歩により信号源推定精度も向上している^{11,12)}。本研究では、ダイポール解析とERSP解析を組み合わせ、温冷感(実験1)と熱的快適感(実験2)の形成に関連する脳活動の時空間パターンを解明することを目的とした。なお、実験1の詳細は、Watanabe et al. *Neuroscience*, 2025に示している。

2. 方法

2.1 対象者

本研究のすべてのプロトコルはヘルシンキ宣言を遵守し、早稲田大学の人を対象とする研究に関する審査委員会の承認を得て実施した(承認番号:2023-212)。すべての対象者から実験参加前にインフォームドコンセントを得て、実験を行った。実験1は健康な若齢成人20名(男性11名、女性9名)、実験2では健康な若齢成人12名(男性11名、女性1名)が参加した。全員が非喫煙者で、神経筋疾患の既往がなく、薬物を服用していなかった。実験24時間前からカフェイン・アルコール摂取と激しい運動を禁止した。

2.2 実験手順

2.2.1 実験1

実験は人工気候室(室温25℃、湿度50%)内で実施した。対象者は下着、Tシャツ、ハーフパンツ、靴下に着替え、実験用のリクライニングチェ

アに座り30分間の安静後、右手示指・中指を直径3cm、銅板被覆のペルチェ装置(Intercross社製)に接触させた。

温度刺激は、15秒間の統制温刺激(32℃)に続いて10秒間の条件温刺激(冷刺激24℃または温刺激40℃)のペア刺激とした。この温度設定は疼痛を誘発せず、冷・温感を惹起するよう予備実験に基づき設定した。条件ごとに、各セッションで10回のペア刺激を4セッション実施し、計40回の応答を記録した。セッション間には30秒の休息を設け、2条件の順序はランダム化した。対象者は、測定中に閉眼し、筋活動によるアーチファクトを最小化するため身体をリラックスするように指示された。各条件終了後、視覚的評価尺度(VAS)を用い、局所(指)および全身の温冷感ならびに熱的快・不快感を評価した。生理的パラメーターとして、心拍数、平均血圧、耳内温、平均皮膚温を連続測定したが条件間での差異は確認されなかった。

EEG測定には32ビットプロセッサボード(Cyton Biosensing Board, OpenBCI)を使用し、国際10-20法に則り15電極を配置した(Fp1, Fp2, F3, Fz, F4, F7, F8, C3, Cz, C4, P3, Pz, P4, O1, O2)。右耳朶に基準電極を配置し、インピーダンスは5kΩ以下に維持した。データは、サンプリング周波数128Hzで取得した。EEG解析にはEEGLAB version 2022.1を使用した。前処理として1-40Hzバンドパスフィルタを適用し、条件温刺激前2秒から後10秒をエポック化した。振幅が±100 μVを超えるエポック、およびスペクトルパワーが平均±3を超えるエポックを除外した。その結果、冷条件で2.1±2.2エポック(5.1±5.5%)、温条件で1.9±2.1エポック(4.8±5.3%)が除外された。

EEG解析はEEGLABを使用し¹³⁾、各対象者から15成分を抽出した(全300成分)。ダイポール解析にはDIPFIT function (version 2.3)を使用し、

残差分散が15%を超える成分は除外した(25成分, 8.3%)。ICクラスタリングにはk-means法を用い、空間トポグラフィーマップ、双極子位置、パワースペクトラムを決定因子とした。目標クラスタの選択基準は70%以上の対象者($n \geq 14$)が寄与するクラスタとした。Brodmann領域の同定にはTalairach Client (version 2.4.3)を使用し、双極子重心位置から4mm以内の最有意ボクセルを基準とした。ERSP解析では、各目標クラスタで1-40HzのERSPを条件間比較した。解析区間は条件温刺激前2秒から後10秒とし、Morlet wavelet変換を適用した(1Hzで3サイクルから40Hzで40サイクル)。200時点(-332-8324ms)と79周波数点(1-40Hz線形間隔)を生成し、窓サイズ3336ms、時間分解能88msとした。EEGデータに対しては、EEGLABプラグインを用いて、試行間のERSPの時周波数結果の差を比較するためにパーミュテーション検定を実施した。パーミュテーション検定では、第一種の過誤を回避するためにFalse Discovery Rate法による補正が必要となる場合があるが、本研究では時間要因の水準が多数存在するため、統計的有意差の検出が困難であることから補正は適用しなかった。さらに、 θ (4-7Hz)、 μ (8-13Hz)、 β (15-25Hz)帯域の平均パワー変化を算出し、3次多項式回帰分析を実施し、各ダイポールにおける周波数帯域のパワー変化のパターンを評価した。

2. 2. 2 実験2

実験2は温度刺激以外を実験1と同様とした。温熱刺激は、全身温刺激(TSbody)として水循環スーツを使用し、17°C(Cbody)または47°C(Hbody)の水を2L/分で灌流した。局所刺激(TSlocal)として両側頸部にペルチェ装置を装着し、32°Cの統制温刺激(Nlocal)15秒に続いて24°C(Clocal)または40°C(Hlocal)の条件温刺激10秒を各条件40回実施した。全身温刺激の順序はCbodyの後にHbodyとした。局所温刺激の

順序は各対象者でランダム化し、試行間に30秒以上の休息を設けた。全身温刺激を与え、各温度が安定した後に局所刺激を開始し、閉眼状態でEEG測定を実施した。なお、Cbody後には、32°C(Nbody)の水を灌流させ、耳内温および皮膚温が一定になった時点で、EEG測定は行わず、各条件刺激を10セット実施した。CbodyNlocal, CbodyClocal, CbodyHlocal, NbodyNlocal, NbodyClocal, NbodyHlocal, HbodyNlocal, HbodyClocal, HbodyHlocalにおける局所(頸部)および全身の熱的快・不快感ならびに温・冷感を、VASを用いて評価した。

EEG測定・解析は実験1と同様の設定で実施した。前処理後、CbodyClocal試行で 0.9 ± 2.9 エポック($2.3 \pm 7.2\%$)、CbodyHlocal試行で 0.1 ± 0.3 エポック($0.2 \pm 0.7\%$)、HbodyClocal試行で 3.4 ± 6.4 エポック($8.5 \pm 15.9\%$)、HbodyHlocal試行で 5.7 ± 7.8 エポック($14.2 \pm 19.5\%$)を除外した。7名以上(約70%)の対象者が寄与するクラスタのみを目標クラスタとして選択し、刺激後の各周波数帯域における有意なパワー変化は、対応のあるt検定を用い、刺激前のそれぞれの平均パワーと統計的差異($P < 0.05$)が256ms以上継続する摂動を有意な時間的神経活動の変化と定義した。

2. 3 統計解析

実験1におけるVASによる局所と全身の温冷感と熱的快・不快感については、対応のあるt検定を用いて分析した。各周波数帯域のパワーに対する多項式の適合度は、決定係数(R^2)およびF統計量(OriginPro 2024b, Lightstone, 東京, 日本)を用いて評価した。実験2におけるVASによる局所と全身の温冷感と快・不快感については、対応のある二元配置分散分析(TSbody \times TSlocal)を用いて分析した。統計解析はSPSSソフトウェア(SPSS Statistics 27; IBM社, Armonk, NY, USA)を用いて実施し、有意水準は $P < 0.05$ に設定した。

表1 VASにより評価した局所(指)および全身の温冷感と熱的快・不快感

変数	条件		Paired t-test P value
	冷条件(24℃)	温条件(40℃)	
指			
温冷感	-64.4 ± 23.3	69.0 ± 23.4	< 0.001
熱的快・不快感	-1.5 ± 30.0	5.60 ± 45.0	0.554
全身			
温冷感	-8.8 ± 16.3	8.9 ± 12.1	0.002
熱的快・不快感	0.5 ± 17.4	2.8 ± 20.9	0.272

平均値 ± 標準偏差

3. 結果

3.1 実験1

VAS評価による温熱快適性 (P = 0.554) または全身の快・不快感 (P = 0.740) に有意差はみられなかった(表1)。しかし、局所 (P < 0.001) および全身の温冷感 (P = 0.003) では条件間に有意差が認められた。全対象者が冷条件では冷たいと感じ、温条件では温かいと感じた(表1)。

クラスタリングにより、10個のクラスタが同定された。これらは右内側前頭回 (MNI座標: x = 9, y = 4, z = 55; BA6), 右前中心回 (MNI座標: x = 50, y = -3, z = 24; BA6), 左前中心回 (MNI座標: x = -46, y = 0, z = 38; BA6), 右楔前部 (MNI座標: x = 3, y = -56, z = 55; BA7), 右帯状回 (MNI座標: x = 12, y = -57, z = 5; BA30), 左帯状回 (MNI座標: x = -14, y = -31, z = 29), 右中前頭回 (MNI座標: x = 37, y = 45, z = 9; BA10), 右上前頭回 (MNI座標: x = 2, y = 60, z = 2; BA10), 右楔部 (MNI座標: x = 9, y = -77, z = 24; BA18), 左中後頭回 (MNI座標: x = -36, y = -78, z = 9; BA19) が含まれた(図1, 表2)。

ERSP解析では、各周波数帯域におけるパワー変化が観察され(図1)、3次多項式回帰分析では、右楔前部の冷条件μ帯域を除き、全ての脳領域・周波数帯域で有意な適合が認められた (P < 0.001)。R²値は0.03から0.93まで広範囲に分布し、回帰係数パターンは条件・周波数帯域・脳領域間で異なっていた(図1)。

3.2 実験2

予想通り、全身の温冷感にはTSbodyの主効果が認められたが、TSlocalの主効果は認められなかった (TSbody: P < 0.001; TSlocal: P = 0.147; 交互作用: P = 0.299; 図2)。事後分析の結果、CbodyはNbodyよりも強い冷感を、HbodyはNbodyよりも強い温感を引き起こしたことが明らかとなった (いずれも P < 0.001)。また、全身の熱的快・不快感に対しては、TSbodyおよびTSlocalの両方に有意な主効果が認められた (TSbody: P < 0.001; TSlocal: P = 0.012; 交互作用: P = 0.183; 図2)。事後分析では、CbodyおよびHbodyはNbodyと比較して有意に不快感を誘発した (いずれも P < 0.001) 一方で、CbodyとHbody間には差がなかった (P = 1.000)。さらに、Nlocalと比較してClocalでは熱的快・不快感が変化したが (P = 0.010)、Hlocalでは変化しなかった (P = 1.000)。頸部の温熱感については、TSbodyの主効果は認められなかったが、TSlocalの主効果が有意に認められた (TSbody: P = 0.512; TSlocal: P < 0.001; 交互作用: P = 0.139; 図2)。事後分析により、ClocalはNlocalよりも強い冷感を、HlocalはNlocalよりも強い温感を頸部において引き起こすことが示された (いずれも P < 0.001)。一方、局所の熱的快・不快感については、TSlocalの主効果およびTSlocal × TSbodyの交互作用効果の両方が認められた (TSbody: P = 0.565; TSlocal: P = 0.004; 交互作用: P < 0.001; 図2)。事後分析により、Cbody条件下では、Clocalは不快感を、Hlocal

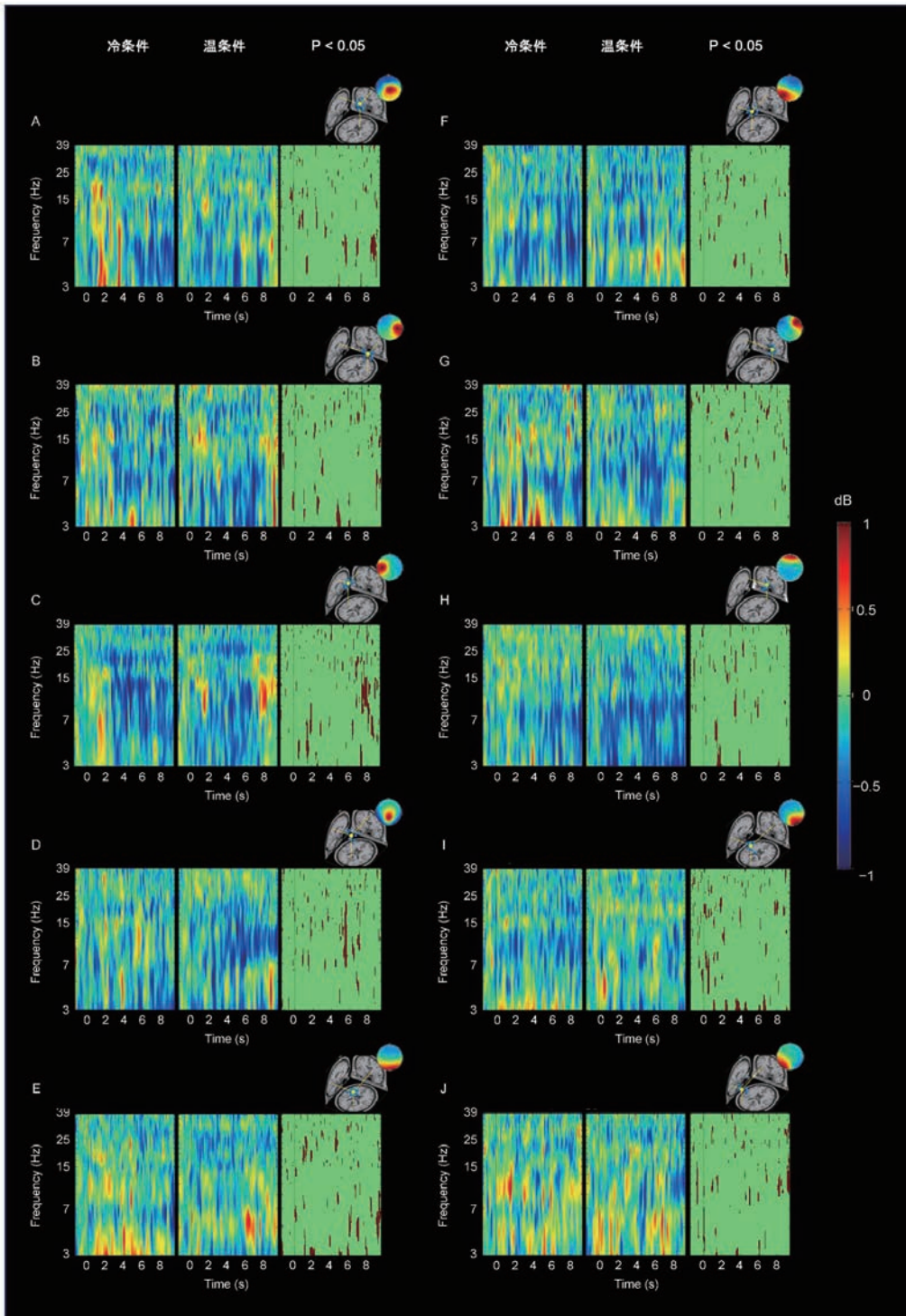


図1 時間-周波数プロットは、各活性化脳領域における事象関連スペクトル変動 (ERSP) を示している (右内側前頭回:A, 右前中心回:B, 左前中心回:C, 右楔状部:D, 右帯状回:E, 左帯状回:F, 右中前頭回:G, 右上前頭回:H, 右楔部:I, 左中後頭回:J). 各領域において、左および中央のパネルは冷条件および温条件のERSPをそれぞれ示す。青はパワーの減少を、赤はパワーの増加を表す。右のパネルはパーミュテーション検定の結果を示し、両条件間で有意差が認められた領域 ($P < 0.05$) は濃赤色で示している。

表2 クラスタリングにより同定された
温冷感に関連する脳領域

脳領域	半球	MNI(x, y, z)	ブロードマン脳領域
中心前回	右	50, -3, 24	6
	左	-46, 0, 38	6
楔前部	右	3, -56, 55	7
内側前頭回	右	9, 4, 55	6
内側前頭回	右	37, 45, 9	10
上前頭回	右	2, 60, 2	10
楔部	右	9, -77, 24	18
後頭回	左	-36, -78, 9	19
帯状回	右	12, -57, 5	30
	左	-14, -31, 29	

は快適感を誘発することが示された (Clocal vs. Nlocal: $P = 0.001$; Hlocal vs. Nlocal: $P < 0.001$). 一方で, Hbody条件下では, ClocalおよびNlocalは温熱快・不快感を変化させなかった (Clocal vs. Nlocal: $P = 1.000$; Hlocal vs. Nlocal: $P = 0.133$).
クラスタリングにより, 8個のクラスタが同定された. これらには右上前頭回 (MNI座標: $x = 16, y = 65, z = -2$), 左内側前頭回 (MNI座標: $x = -23, y = 43, z = 7$; BA10), 右内側前頭回 (MNI

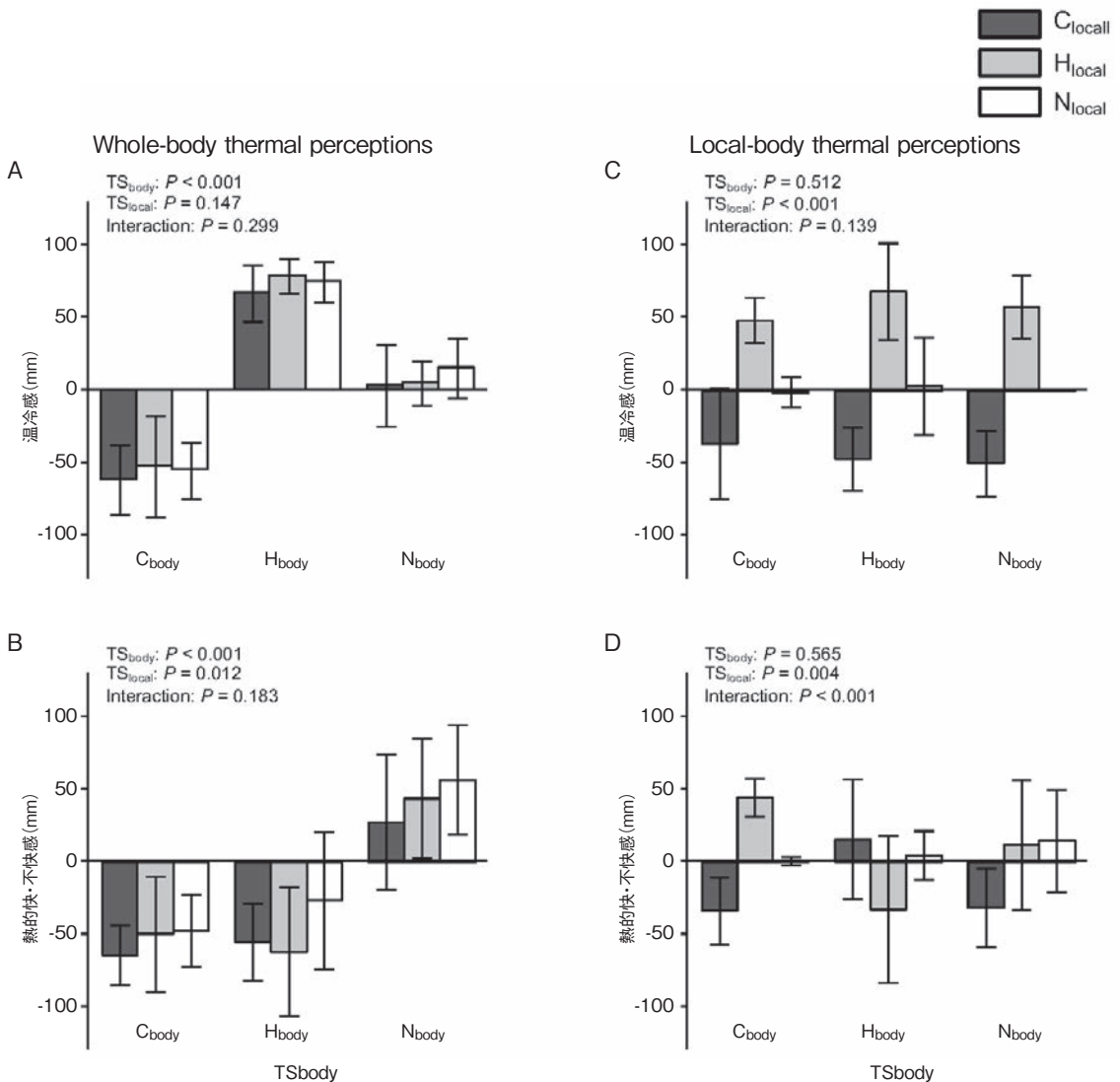


図2 全身および局所の温冷感および熱的快・不快感に関する視覚的評価尺度 (VAS) 評価
全身温度刺激 (TSbody) は冷 (24° C, Cbody), 温 (40° C, Hbody), 統制 (32° C, Nbody) の3条件で, これらと同時に局所温度刺激 (TSlocal) として冷 (17° C, Clocal), 温 (47° C, Hlocal), 統制 (32° C, Nlocal) を付与した. (A, C) 温冷感の評価スコア: 全身 (A) および局所 (C). (B, D) 熱的快/不快感の評価スコア: 全身 (B) および局所 (D)

座標 : $x = 14, y = -2, z = 50$; BA6), 右中側頭回 (MNI座標 : $x = 41, y = -63, z = 17$; BA39), 左帯状回 (MNI座標 : $x = 0, y = 18, z = 45$), 右前帯状回 (MNI座標 : $x = 16, y = 32, z = 1$), 右後帯状

回 (MNI座標 : $x = 4, y = -61, z = -19$; BA23), 左島皮質 (MNI座標 : $x = -48, y = -37, z = 18$; BA13) が含まれていた (図3).

ERSP解析では, 各周波数帯域におけるパワー

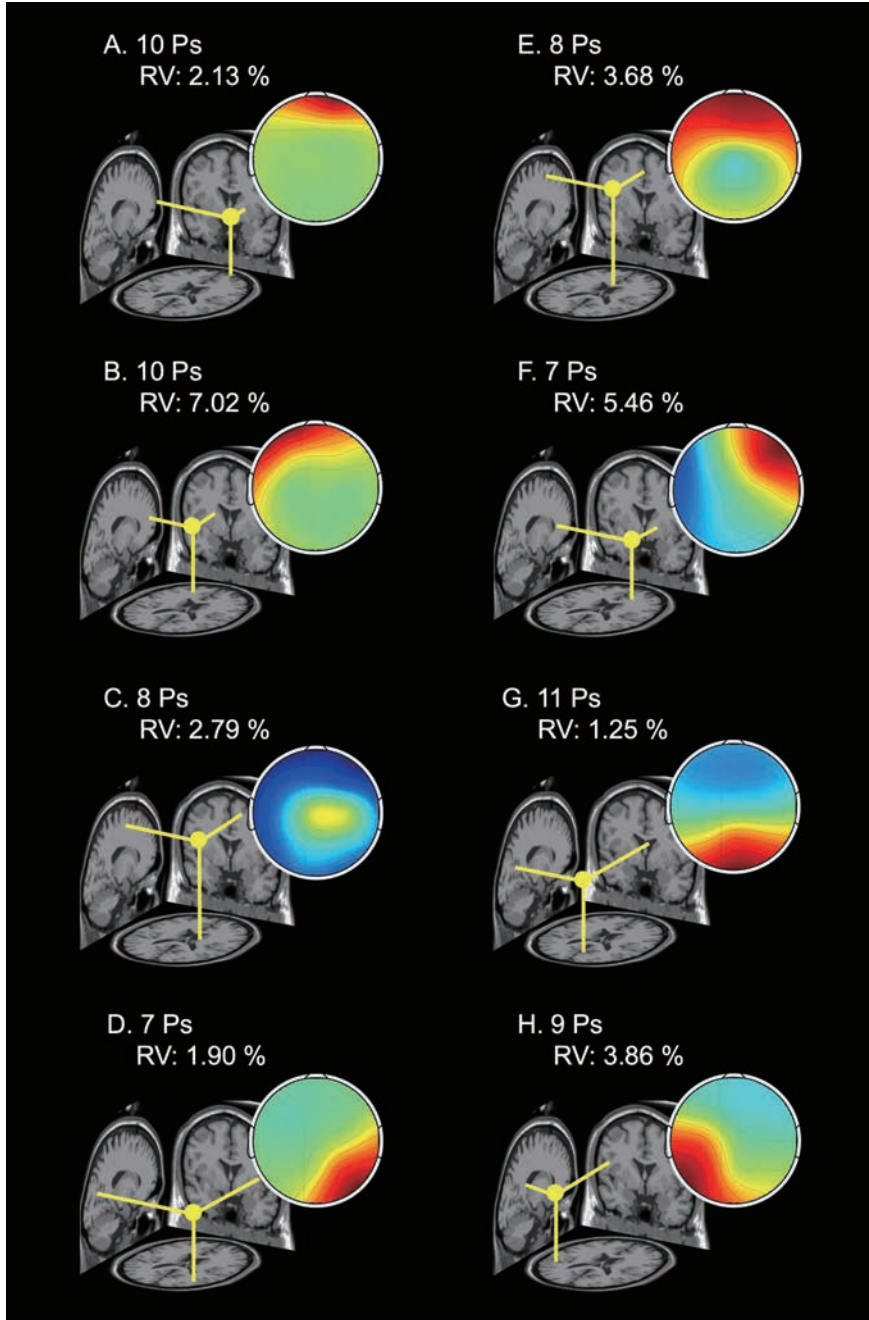


図3 局所温度刺激 (ClocalおよびHlocal, Nlocal) が全身温度刺激 (CbodyおよびHbody) と同時に付与された際の, 各ダイポールにより同定された脳領域を示す (A) 右上前頭回, (B) 左内側前頭回, (C) 右内側前頭回, (D) 右中側頭回, (E) 左帯状回, (F) 右前帯状回, (G) 右後帯状回, (H) 左島回. 青はパワーの減少を, 赤はパワーの増加を表す.

変化が観察され、256ms以上継続する摂動を有意な時間的神経活動の変化と定義した結果、CbodyClocal条件（不快）では右中側頭回の θ 帯域（2.5-8.2 s）、左帯状回の θ 帯域（1.8-4.1 s）、左島皮質の θ 帯域（7.2-8.1s）、右上前頭回の μ 帯域（4.9-5.3 s）、右内側前頭回の μ 帯域（3.5-8.3 s）、右中側頭回の μ 帯域（3.1-3.5 s）、右後帯状回の μ 帯域（0.4-8.3 s）、左帯状回の μ 帯域（1.1-1.6 s）、右後帯状回の β 帯域（1.0-8.3 s）で活性化が認められた。CbodyHlocal条件（快）では右後帯状回の θ 帯域（1.0-1.6 s）、右後帯状回の μ 帯域（2.5-2.9 s）、左島皮質の μ 帯域（7.6-7.9 s）、左島皮質の β 帯域（3.9-4.3 s）で活性化が認められた。HbodyClocal条件（快適）では右・左内側前頭回の θ 帯域（1.4-7.6 s, 4.8-6.4 s）、左内側前頭回の μ 帯域（7.5-7.9 s）、右内側前頭回の β 帯域（4.3-4.9 s）で活性化が認められた。HbodyHlocal条件では256ms以上継続する有意な摂動は認められず、これは主観評価で快適感の変化がなかったことと一致していた（図4、表3）。

4. 考 察

4. 1 温冷感の形成メカニズム（実験1）

局所温・冷刺激に対し、楔前部、前中心回、内側前頭回など10の重複する脳領域が活性化した。楔前部は高次認知機能、前中心回は運動制御、前頭回は認知処理、帯状回は感情・記憶処理に関与しており¹⁴⁻¹⁶、温冷感が多様な脳機能の統合により生成されることが示された。重要な点として、同一脳領域でも冷・温刺激で異なる時間的神経振動パターンを示したことである。3次多項式回帰分析により、回帰係数パターンが条件・周波数帯域・脳領域間で異なることが明らかになった。これは、ラベルライン理論とは異なり、同一脳領域における異なる処理メカニズムによって温度判別が行われることを示唆している。 θ 波（注意）、 μ 波（感覚運動処理）、 β 波（覚醒・集中）の周波

数特性の違いも、感覚の複雑な神経処理を反映している¹⁷。また、冷刺激を伝達するA δ 線維と温刺激を伝達するC線維の伝導速度の違い¹⁸⁻²⁰、および皮質での二相性反応（急速な初期反応と緩徐な適応反応）が、観察された時間的パターンの差異に寄与していると考えられる。

4. 2 温熱快・不快感の形成メカニズム（実験2）

実験2では、温熱快適感と不快感で明確に異なる時空間活動パターンが観察された。特に重要な発見は、同じ局所刺激でも全身条件により主観的快適性が変化し、それに対応した脳活動パターンの違いが検出されたことである。不快条件（CbodyClocal）では上前頭回、内側前頭回、中側頭回、後帯状回、帯状回、島皮質という広範囲の脳領域が活性化したのに対し、快適条件（CbodyHlocalやHbodyClocal）では限定的な領域の活性化のみが認められた。これは、不快感の処理により多くの認知・感情資源が動員されることを示唆している。上前頭回は認知・運動制御・感覚ネットワークのハブとして機能し、内側前頭回は高次認知機能、中側頭回は意識的記憶、前帯状回は感情評価、後帯状回はエピソード記憶、島皮質は感覚・感情統合に関与しているとされている^{15, 16, 21-23}。これらの知見は、熱的快・不快が複数の認知・感情脳ネットワークの統合活動により生成されることを示している。注目すべきは、256ms以上継続する有意な摂動の定義により、機能的に関連する脳活動を明確に分離できたことである。HbodyHlocal条件で有意な長期摂動が認められなかったことは、主観評価で熱的快・不快感がなかったことと一致しており、この定義の妥当性を支持しているかもしれない。

4. 3 限 界

本研究にはいくつかの限界がある。15電極による空間分解能の制限、個人差の評価不足が挙げられる。

表 3A クラスタリングおよび事象関連スペクトル摂動(ERSP)解析によって同定された脳領域

脳領域 (x, y, z)	半球	BA	Frequency band	C _{body} C _{local}	条 C _{body} H _{local}	件 H _{body} C _{local}	H _{body} H _{local}
上前頭回 (16, 65, -2)	右		Θ			7.80-7.89	1.19-1.45
			μ	2.19-2.28 4.89-5.28 7.28-7.50			
			β			4.19-4.32 4.67-4.89	
内側前頭回 (-23, 43, 7)	左	10	Θ			1.41-2.19 3.14-3.23 3.71-4.46 7.19-7.57	1.28-1.50 3.58-3.71
			μ	1.54-1.62 2.62-2.71 3.58-3.71 5.46-5.50 6.50-6.71		0.53-0.71 1.41-1.45 2.28-2.50 6.06-6.24 7.46-7.94	
			β	0.58-0.67 2.23-2.32		1.06-1.14 4.67-4.80 5.85-5.93	
内側前頭回 (14, -2, 50)	右	6	Θ		2.32-2.41 5.92-6.01	4.80-5.10 5.76-6.37	
			μ	3.54-3.89 4.76-5.50 5.93-8.33			
			β		4.46-4.62 7.15-7.24	0.45-0.54 4.28-4.85	
中側頭回 (41, -63, 17)	右	39	Θ	1.28-1.50 2.54-4.06 4.85-5.28 5.85-6.78 7.50-8.24			
			μ	3.14-3.46 6.46-6.54 8.06-8.33		5.46-5.58 7.02-7.10	
			β		1.89-2.14	5.10-5.37	
帯状回 (0, 18, 45)	左	32	Θ	1.50-1.54 1.84-2.32 3.67-4.14 7.24-7.37	2.45-2.58		0.45-0.58 4.67-4.76
			μ	1.10-1.58	7.94-8.15	0.49-0.62 1.93-2.02 3.02-3.29	
			β				
前帯状回 (16, 32, 1)	右		Θ	3.58-3.62		1.14-1.19 5.93-6.15	0.50-0.58
			μ			2.76-2.93	
			β	0.71-0.89 2.06-2.10 6.15-6.41		2.02-2.10	

5. 結 論

本研究により、温冷感および熱的快・不快感の形成に関連する脳活動の時空間パターンに関する重要な知見が得られた。温冷感では共通の脳領域

が活性化するが、冷・温刺激で異なる時間的パターンを示すことで判別が行われる。熱的快適感では、快適・不快感で明確に異なる時空間活動パターンが観察され、不快感の形成には広範囲の認知・感情関連領域が動員される。これらの知見は、EEG

表 3B クラスタリングおよび事象関連スペクトル摂動(ERSP)解析によって同定された脳領域

脳領域 (x, y, z)	半球	BA	Frequency band	C _{body} C _{local}	条 C _{body} H _{local}	件 H _{body} C _{local}	H _{body} H _{local}	
後帯状回 (4, -61, -19)	右	23	Θ		1.02-1.58	3.54-3.76	4.19-4.41	
					6.98-7.10		5.37-5.62	
					0.41-2.10			
					2.39-4.67			
					4.98-5.10			
			μ		2.54-2.89			
					5.41-5.89			
					6.67-7.41			
					7.76-8.33			
視床下部 (-48, -37, 18)	左	13	Θ		5.67-5.71			
					6.37-6.46			
					3.14-3.41		0.02-0.14	
					4.80-4.93			
					6.37-6.50			
					7.24-8.06			
				μ		6.41-6.62		
							1.58-1.84	
							4.15-4.28	
							4.89-4.93	
		7.58-7.94						
β			1.32-1.37	1.75-1.84				
			6.76-6.80	3.41-3.54				
				3.89-4.28				
				4.85-5.10				
				5.28-5.50				
				6.28-6.41				
				7.06-7.15				
				7.94-8.06				

BA, ブロードマン脳領域

スペクトルパワーの変動は, TSlocalの付与から, 少なくとも256 ms間持続した場合は太字で示され, 変動が認められなかった場合は非太字で示されている。

技術の発展により, 将来的には個人適応型の衣服の快適性の評価システムの開発や, 医療・介護施設での温熱環境最適化へのシステム応用が期待される。

謝 辞

著者らは実験参加者の方々に感謝の意を表す。本研究は公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団 (H.W) および日本学デサントスポーツ科学 Vol. 47

術振興会科学研究費助成事業 (基盤研究 A : JP 19H01128, K.N) の支援を受けた。

文 献

- 1) M. Cabanac, Physiological role of pleasure: A stimulus can feel pleasant or unpleasant depending upon its usefulness as determined by internal signals, *Science*, (80-.) 173, 1103-1107 (1971)
- 2) H. Hensel, Thermoreception and temperature regulation, *Monogr. Physiol. Soc.*, 38, 1-321. <https://>

- doi.org/10.1177/1748895811401979 (1981)
- 3) J.C. Pereira, R.C. Alves, The labelled-lines principle of the somatosensory physiology might explain the phantom limb phenomenon, *Med. Hypotheses*, 77, 853–856. <https://doi.org/10.1016/j.mehy.2011.07.054>, (2011)
 - 4) A.D. Craig, J.O. Dostrovsky, Differential projections of thermoreceptive and nociceptive lamina I trigeminothalamic and spinothalamic neurons in the cat, *J. Neurophysiol.*, 86, 856–870. <https://doi.org/10.1152/jn.2001.86.2.856> (2001)
 - 5) C. Ran, M.A. Hoon, X. Chen, The coding of cutaneous temperature in the spinal cord, *Nat. Neurosci.*, 19, 1201–1209. <https://doi.org/10.1038/nn.4350> (2016)
 - 6) D.A. Yarmolinsky, Y. Peng, L.A. Pogorzala, M. Rutlin, M.A. Hoon, C.S. Zuker, Coding and plasticity in the mammalian thermosensory system, *Neuron*, 92, 1079–1092. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2016.10.021> (2016)
 - 7) F. Wang, E. Bélanger, S.L. Côté, P. Desrosiers, S.A. Prescott, D.C. Côté, Y. De Koninck, Sensory afferents use different coding strategies for heat and cold, *Cell Rep.*, 23, 2001–2013. <https://doi.org/10.1016/j.celrep.2018.04.065> (2018)
 - 8) K. Nagashima, H. Nakata, T. Harada, I. Kato, N. Sadato, Differences in the neural networks of thermal sensation with and without evaluation process, *IBRO Neurosci. Reports*, 13, 274–283. <https://doi.org/10.1016/j.ibneur.2022.09.006> (2022)
 - 9) Y. Aizawa, T. Harada, H. Nakata, M. Tsunakawa, N. Sadato, K. Nagashima, Assessment of brain mechanisms involved in the processes of thermal sensation, pleasantness/unpleasantness, and evaluation, *IBRO Reports*, 6, 54–63. <https://doi.org/10.1016/j.ibror.2019.01.003> (2019)
 - 10) Y. Aizawa, T. Harada, H. Nakata, M. Tsunakawa, N. Sadato, K. Nagashima, Assessment of brain mechanisms involved in the processes of thermal sensation, pleasantness/unpleasantness, and evaluation, *IBRO Reports*, 6, 54–63. <https://doi.org/10.1016/j.ibror.2019.01.003> (2019)
 - 11) S. Shibuya, S. Unenaka, S. Shimada, Y. Ohki, Distinct modulation of mu and beta rhythm desynchronization during observation of embodied fake hand rotation, *Neuropsychologia*, 159, 107952. <https://doi.org/10.1016/j.Neuropsychologia.2021.107952> (2021)
 - 12) S. Shibuya, S. Unenaka, T. Zama, S. Shimada, Y. Ohki, Sensorimotor and posterior brain activations during the observation of illusory embodied fake hand movement, *Front. Hum. Neurosci.*, 13, 1–12. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2019.00367> (2019)
 - 13) A. Delorme, S. Makeig, EEGLAB: An open source toolbox for analysis of single-trial EEG dynamics including independent component analysis, *J. Neurosci. Methods*, 134, 9–21. <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2003.10.009> (2004)
 - 14) A.E. Cavanna, M.R. Trimble, The precuneus: A review of its functional anatomy and behavioural correlates, *Brain*, 129, 564–583. <https://doi.org/10.1093/brain/awl004> (2006)
 - 15) F.L. Stevens, R.A. Hurlley, K.H. Taber, Anterior cingulate cortex: Unique role in cognition and emotion, *J. Neuropsychiatry Clin. Neurosci.*, 23, 121–125. <https://doi.org/10.1176/jnp.23.2.jnp121> (2011)
 - 16) R. Leech, D.J. Sharp, The role of the posterior cingulate cortex in cognition and disease, *Brain*, 137, 12–32. <https://doi.org/10.1093/brain/awt162> (2014)
 - 17) W. Klimesch, EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance, *Brain Res. Rev.*, 29, 169–195. [https://doi.org/10.1016/S0165-0173\(98\)00056-3](https://doi.org/10.1016/S0165-0173(98)00056-3) (1999)
 - 18) P. Hüllemann, A. Nerdal, A. Binder, S. Helfert, M. Reimer, R. Baron, Cold-evoked potentials—Ready for clinical use?, *Eur. J. Pain*, 20, 1730–1740. <https://doi.org/10.1002/ejp.896> (2016)
 - 19) R. De Keyser, E.N. van den Broeke, A. Courtin, A. Dufour, A. Mouraux, Event-related brain potentials elicited by high-speed cooling of the skin: A robust and non-painful method to assess the spinothalamic system in humans, *Clin. Neurophysiol.*, 129, 1011–1019. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2018.02.123> (2018)
 - 20) C. Leone, A. Dufour, G. Di Stefano, A. Fasolino, A. Di Lionardo, S. La Cesa, E. Galosi, M. Valeriani, M. Nolano, G. Cruccu, A. Truini, Cooling the skin for assessing small-fibre function, <https://doi.org/10.1097/j.pain.0000000000001584> (2019)
 - 21) M. Snellekx, S.L. Rossell, A. Gibbons, J. Nithianantharajah, B. Dean, Evidence that the frontal pole has a significant role in the pathophysiology of schizophrenia, *Psychiatry*

- Res. 317, 114850. <https://doi.org/10.1016/j.psychres.2022.114850> (2022)
- 22) D.D. Jobson, Y. Hase, A.N. Clarkson, R.N. Kalaria, The role of the medial prefrontal cortex in cognition, ageing and dementia, *Brain Commun.*, 3, <https://doi.org/10.1093/braincomms/fcab125> (2021)
- 23) L.R. Squire, C.E.L. Stark, R.E. Clark, The medial temporal lobe, *Annu. Rev. Neurosci.*, 27, 279–306. <https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.27.070203.144130> (2004)