



東京学芸大学リポジトリ

Tokyo Gakugei University Repository

ペルチェ素子による体冷却に伴う快適性に関する研究：精神作業への影響について

| | |
|-------|--|
| メタデータ | 言語: Japanese 出版者: 東京学芸大学大学院連合学校教育学研究科 公開日: 2024-05-22 キーワード (Ja): ペルチェ素子, 体冷却, 温熱快適性, 精神作業能, Peltier device, ETYP: 教育関連論文 キーワード (En): body cooling, thermal comfort, mental performance 作成者: 陳, 静, 田中, 英登 メールアドレス: 所属: 東京学芸大学, 松山大学 |
| URL | https://doi.org/10.50889/0002000456 |

ペルチェ素子による体冷却に伴う快適性に関する研究

— 精神作業への影響について —

陳 静*・田中 英登**

1. 問題と目的

地球温暖化の影響で、日本の猛暑日の平均年間日数は増加しており、夏季の高温環境下での生活は非常に不快である。また、不快感の上昇とともに認知機能が低下するため、作業や学習にも影響を与える（中川ら、2014）。加藤ら（2018）は教室環境が生徒の学習効率に影響を与え、特に温冷感からの影響が最も大きい可能性を指摘している。実地調査により、温熱環境は学習意欲を低下させる要因であり、温熱環境の満足度が低いと学習意欲や集中力及び授業の理解力が低下すると報告されている（川久保ら、2014）。

現在、通常の暑さ対策として、冷房や日除けによる日射の低減などがよく行われているが、限界があり、暑さ問題を根本的に解決するには至っていない。また、経済的な問題で冷房が普及されていない地域があり、このような環境は生徒の学習に影響すると考えられる。学習効率向上のため、学校現場におけるより有効な暑さ対策を考案することは重要な課題である。一方、暑熱環境以外にやや温かい温熱環境は同様に学習意欲を低下させる（川久保ら、2014）。Wargockiら（2007）は教室温を25℃から20℃に下げると、温熱感覚がやや温かい状態からニュートラルな状態に変化し、数値及び言語試験の成績が有意に向上することを報告している。安岡ら（2017）は28℃の環境条件下、反応時間が有意に速くなり、課題への適応能力に関する作業効率が高いことを示している。

これまで、学校現場における空間環境と作業効率と

の関係について、多くの研究は教室環境全体の改善による学習効率の向上に注目している。しかし、広い空間環境を一定の温度に長時間維持するのは非効率である。また、省エネルギー政策の実施とともに、学校現場の省エネ対策は慎重に行う必要があることが指摘されている（文部科学省、2019）。さらに、Hwangら（2022）の調査により、小学校で85%以上の学力を達成するためには、23～25℃の教室温度が最適だが、気候帯により教室の設定温度が異なる。そして、Zomorodianら（2016）は同じ気候帯で行われた研究でも、熱的中性域には大きなばらつきがあり、同じ教育段階にある学生間でも、熱的中性域の相違があると報告した。地域や個人差などによる温熱環境の満足度を上げるのは困難であるため、学習主体とする生徒に着目した学習効率向上方法の検討は必要である。

一般的に、認知機能の評価には脳波測定が生理的指標として用いられる。また、ストループテストは、注意や行動の適切な制御能力を測定するための課題として多くの研究で使われている。過去の研究によれば、注意力の低下は中枢神経系の疲労及び脳活動の低下に起因し、高体温が一つの要因とされている（Hasegawa et al., 2008）。体温を下げる方法として、ひんやりタオルや送風などは冷却効果が持続しない、深部への影響が小さいと指摘されている（長谷川、2018）。さらに、鈴木ら（2020）の冷却ベストを用いた実験では、暑さのVAS値の上昇とともに課題の正答率の低下傾向が示され、温熱的不快感が注意を分散させ、作業効率を低

* ちん せい 東京学芸大学大学院連合学校教育学研究科健康・スポーツ系教育講座

** たなか ひでと 松山大学人文学部

キーワード：ペルチェ素子／体冷却／温熱快適性／精神作業能

下させると指摘した。Shibasakiら(2017)は暑熱環境下での顔や頭部冷却による一般的な身体冷却では、認知処理過程を反映するとされる「P300成分」という脳波の振幅が小さく、認知機能の回復は確認されなかったと報告した。この背景から、本研究では認知機能の評価には、ストループテストを採用し、体温、心拍、気分尺度などを関連指標とした。また、冷却方法について、暑さ対策の冷却法としてペルチェ素子による局部冷却は携帯性、エネルギー効率性、温度制御性、及び冷却の持続性などからみて有効ではないかと考え、著者らはすでに安静時及び軽運動時の効果について検証し、快適性の向上効果を確認している。ペルチェ素子は、直流電流により加熱・冷却・温度制御を自由に行える半導体素子である。電流を流すと、一方の面が吸熱し、反対面に発熱が起こる。ペルチェ素子は小型・軽量で携帯性が高い、使用時に騒音が発生せず、有害ガスを排出しないため環境にも優しい。加えて、電流量に応じて熱量が調節可能で、温度応答性が高い。さらに、温度を自由にプログラム制御でき、持続的な冷却温度を維持し、感覚の個人差が解消できるなどの特徴から、ペルチェ素子を用いた冷却装置は通常の身体外部冷却法の短所をカバーする可能性があると考え、本研究で再び採用した。

本研究では、暑さ対策としてのペルチェ素子局部冷却が精神作業・認知機能にどのような効果があるかを検証することを目的とする。前論文では30分以上の冷却効果があると仮定して実験が行われているため、加えて将来的には学校の授業などへの導入の可能性を考え、授業1コマ分以上の冷却持続性を仮定して実験を実施した。これにより、暑さに対する感受性の個人差を緩和し、公平な学習環境を提供することが可能と

なる。また、生徒が自身の判断で冷却装置を使用することにより、体調管理の自主性や環境適応能力の育成が期待される。さらに、冷却装置の導入は、体温調節の重要性などに関する教育の機会ともなる。そして社会全体のエネルギー効率を向上する可能性も考えられ、地球沸騰化時代に突入した状況下において、この手法は学校教育現場はもとより社会生活においても有効な暑さ対策となることが期待される。

2. 方法

2. 1. 実験条件 (Table. 1)

令和3年11月～令和4年4月、研究当該年の健康診断上特に問題のない正常な男子大学生を対象とした。ストループテストの同時実施人数などの制限を考え、実験室内での生理・心理実験において最低限評価できる被験者数として7名を選定した(年齢: 25.4 ± 1.6 歳, 身長: 174.6 ± 3.6 cm, 体重: 68.7 ± 0.1 kg, BMI: 22.6 ± 3.7 kg/m²)。生理実験では、この程度的人数での評価は一般的であると認識されている。

被験者に事前に実験内容を説明し、参加の同意を得た上で実験を行った。実験前2時間の食事(喫煙も含む)を制限した。環境条件については、7月下旬～8月中旬の猛暑日に空調設備のない地域の室温は35℃を超える可能性があるため、35℃の暑熱環境及び25℃の温熱環境の2条件に設定して、人工気象室(湿度60%RH)において冷却なし・あり(後頸部)の2条件、計4条件で(以下、①室温25℃・冷却なしは「25℃」、②室温25℃・冷却ありは「25℃ cool」、③室温35℃・冷却なしは「35℃」、④室温35℃・冷却ありは「35℃ cool」と表記した。)、ストループテストを95分間行った。4条件は被験者間でランダムな順序で実施した。ま

Table. 1 実験条件

| 項目 | 内容 |
|-----------|---|
| 実験期間 | 令和3年11月～令和4年4月 |
| 被験者 | 男子大学生7名 (25.4 ± 0.1 kg) |
| 身長・体重・BMI | 174.6 ± 3.6 cm・ 68.7 ± 0.1 kg・ 22.6 ± 3.7 kg/m ² |
| 実験条件 | ①25℃ ②25℃ cool ③35℃ ④35℃ cool (被験者間でランダムな順序で実施した) |
| その他 | <ul style="list-style-type: none"> ・一回の実験に500mlの常温水をペットボトルにて提供し、摂取は自由とした ・実験2時間前に食事・喫煙を制限した ・同じ被験者は1回の実験後、2日間の間隔を空けて次の実験を行うようにした |

た、同じ被験者が数日連続で実験を行うと、ストループテストに対する慣れが生じると考え、その影響を抑えるために、同じ被験者は1回の実験後、2日間の間隔を空けて次の実験を行うようにした。

脱水による影響を除外するため、一回の実験には500mlの常温水をペットボトルで提供し、実験中の飲水は自由とした。本研究は、横浜国立大学倫理審査「人を対象とする医学的研究」委員会の承認（承認番号：2021-11）を得た。

2. 2. 測定項目

測定項目として、温度感覚・温熱快適感（全身・冷却部）、疲労感、混乱度の心理指標と平均皮膚温、耳内温、心拍、総発汗量の生理指標を測定した。

作業能率の評価のため、風間ら（2012）が作成したストループ実験プログラムを使用し、パソコンで行った。ストループテストには4種類の課題（①単純文字色選択、②単純文字選択、③複雑文字色選択、④複雑文字選択）があり、20cm×15cmの画面で提示された。流れとして、0分から課題①を開始して、1分目に課題②、2分目に課題③、3分目に課題④を行うというように実施し、①～④を課題1セットとした。被験者は各課題を1分以内に完了するよう指示され、実験中にはタイマーを確認しながら座った状態でパソコンの画面を見て、キーボードのボタンを押して課題を進めた。各課題の所要時間を「反応時間」と定義し、それと誤答数は自動的にプログラムに記録され、実験終了後に1セット毎の平均反応時間及び平均誤答数を算出した。

心理的評価について、ストループテスト中の心理的ストレスを評価するために、一時的気分尺度（Temporary Mood Scale: TMS）を使用した。精神作業に伴うストレスは自律神経の負荷を増やし、疲労を引き起こすことにより脳の活動が低下し、注意力や決断能力が低下することから（南谷, 1997）、本研究では被験者がTMSに回答する際のストレスを最小限に抑えるために、6つの尺度のうち「疲労」と「混乱」の2つの尺度のみを評価することにした。評価は測定開始直前の0分、実験中は12分毎（ストループテスト3セット毎）に行った。

温度感覚・温熱快適感は同様に12分毎（ストループテスト3セット毎）にそれぞれ記録した。温度感覚は、寒い（-4ポイント）、涼しい（-2ポイント）、どちらでもない（0ポイント）、暖かい（+2ポイント）、暑い（+4ポイント）とし、回答してもらい、温熱快適感是不快（-4ポイント）、少し不快（-2ポイント）、どちらでもない（0ポイント）、少し快適（+2ポイント）、快適（+4ポイント）とし、回答してもらった。

皮膚温測定はデータ収集型ハンディタイプ温度計LT8A Series（グラム株式会社製）を用いた。温度計に接続した温度センサーの装着部位には、前腕・胸部・大腿・下腿の4ヶ所を設定し、計測を1分周期にして95分間連続測定を行った。実験後にRamanathanの4点法により平均皮膚温を算出した（平均皮膚温=0.3（胸部+上腕）+0.2（大腿+下腿））。

心拍は心拍計RS800CX（Polar社製）を用いて95分間連続測定して心拍変動分析ソフトウェアKubios HRV Premium（Kubios社製）により、心拍変動に転換し、LF/HF値を解析した。

耳内温測定は耳式体温計M20（テルモ社製）を用いて実験前後に測定した。総発汗量は、高精度ロードセル台はかり（1g精度）ISシリーズSI150IGG-H（ザルトリウス株式会社製）を用いて実験前後に体重を測定し、その差を算出した。

2. 3. 冷却条件

実験中、冷却装置はネックバンドに付けて後頸部にしっかりと接着するように装着した。皮膚との接触面積は5cm×6cm=30cm²であり、装置内部に配置されたペルチェ素子の寸法は4cm×4cm=16cm²であった。

刺激温度について、35℃の室温下で、冷却部の皮膚温を約28℃に保ち、25℃の室温では約25℃に維持するようにした。冷却中は、一定温度を維持するためにフィードバック制御を行い、皮膚との接触面の温度を5秒毎にチェックするよう設定した。接触面の温度が変動すると、刺激温度が波を打つような動きは無く、横ばいになる。例えば、接触面の温度が目標温度よりも高ければ冷却を強め、低ければ冷却を弱めるように調整した。冷却は実験1時間目から35分間行った。

2. 4. プロトコール

実験プロトコールをFig. 1に示す (Fig. 1)。

2. 5. データの処理方法

冷却前後の指標の変化を把握するため、冷却前を5～15セット (計11セット)、冷却後を16～24セット (計9セット) として分け、それぞれをまとめて検定を行った。結果に平均値±SDで表示した。反応時間、誤答数、平均皮膚温、温度感覚・快適感、総発汗量及び心拍数の有意差検定には、IBM社製SPSS Statistics 21を用い、二元配置分散分析を冷却の有無と室温の2要因について行った。交互作用がみられた場合は下位検定を行った。耳内温について、一元配置分散分析を用いて各室温条件下での実験前後の差を分析した。有意水準は $p < 0.05$ とした。

3. 結果

3. 1. 反応時間・誤答数

冷却前後の各条件下での反応時間はFig. 2に示されており、Fig. 3では1セット毎に平均化した反応時間の経時変化を示している。実験初期作業への慣れが生じ、

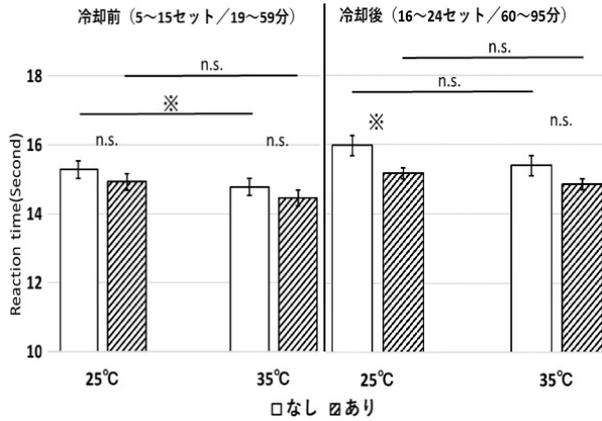
反応時間に影響を与える可能性があるため、5セット目から条件毎に平均反応時間を求めた。

2室温条件とも冷却の方が反応時間は短縮する結果を示した。35℃の室温下では冷却条件間に有意差は見られなかったが、冷却23分までの反応時間が低下する傾向が見られた。分散分析の結果、冷却の主効果 ($F(1, 32) = 7.01, p < .05$) は有意であり、25℃室温において冷却時の反応時間が有意に短縮した。室温の主効果 ($F(1, 32) = 3.21, n.s.$) は有意ではなかった。交互作用はなかった ($F(1, 32) = 0.27, n.s.$)。冷却開始までに室温の主効果のみ有意であり ($F(1, 40) = 7.84, n.s.$)、冷却の主効果及び交互作用が非有意となった ($F(1, 40) = 3.70, n.s.$; $F(1, 40) = 0.01, n.s.$)。

誤答数においては (Fig. 4, 5)、2室温条件における冷却による影響はなかった。冷却及び室温の主効果、交互作用ともに有意ではなかった (それぞれ $F(1, 32) = 2.41, n.s.$; $F(1, 32) = 2.61, n.s.$; $F(1, 32) = 1.05, n.s.$)。なお、冷却前にも有意差はなかった (冷却の主効果: $F(1, 40) = 0.10, n.s.$; 室温の主効果: $F(1, 40) = 0.01, n.s.$; 交互作用: $F(1, 40) = 2.43, n.s.$)。

| | | | |
|-------------------|-------------------------------------|--------------------|----------------------------------|
| 前室 (26℃・40%RH) | -30分 | ・被験者到着, 安静状態保持 | スト ル ー プ テ ス ト |
| | | ・耳内温, 体重の測定 | |
| 人工 気 象 室 | -10分 | ・人工気象室に入室, 安静状態保持 | |
| | | ・安静時に5分間ストループテスト練習 | |
| 0分 | ・温度感覚, 疲労感などの申告 | | |
| | ・皮膚温, 心拍の連続計測開始 | | |
| 11分 | ・ストループテスト開始 | | |
| | ・温度感覚, 疲労感などの申告 | | |
| 23分 | ・温度感覚, 疲労感などの申告 | | |
| 35分 | ・温度感覚, 疲労感などの申告 | | |
| 47分 | ・温度感覚, 疲労感などの申告 | | |
| 59分 | ・温度感覚, 疲労感などの申告直後に冷却開始 (冷却なしの条件を除く) | | |
| 71分 | ・温度感覚, 疲労感などの申告 | | |
| 83分 | ・温度感覚, 疲労感などの申告 | | |
| 95分 | ・温度感覚, 疲労感などの申告 | | |
| | ・ストループテスト, 冷却, 皮膚温, 心拍計測終了 | | |
| 前室 (26℃・40%RH) | | ・耳内温, 体重の測定 | |

Fig. 1 実験プロトコール



※ : $p < .05$; n.s.: nonsignificant difference.

Fig. 2 反応時間

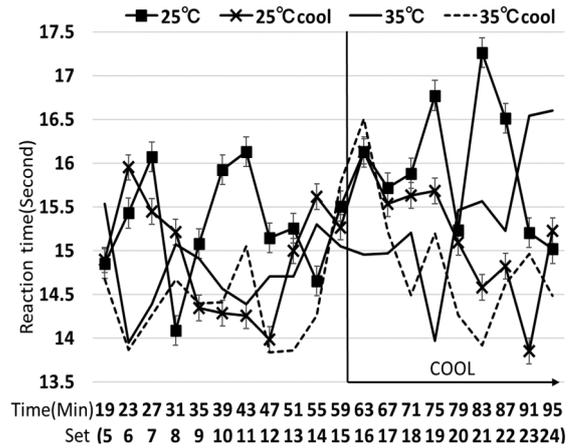
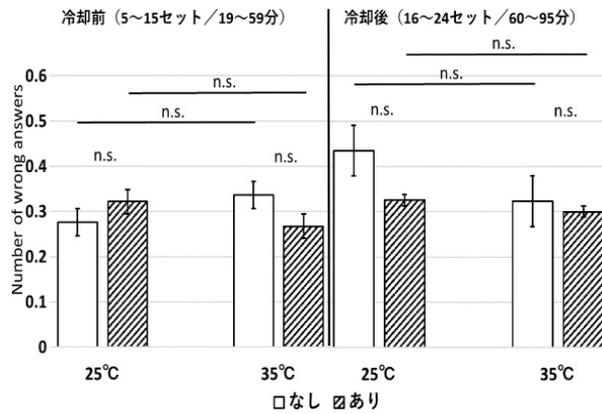


Fig. 3 反応時間の経時変化



※ n.s.: nonsignificant difference.

Fig. 4 誤答数

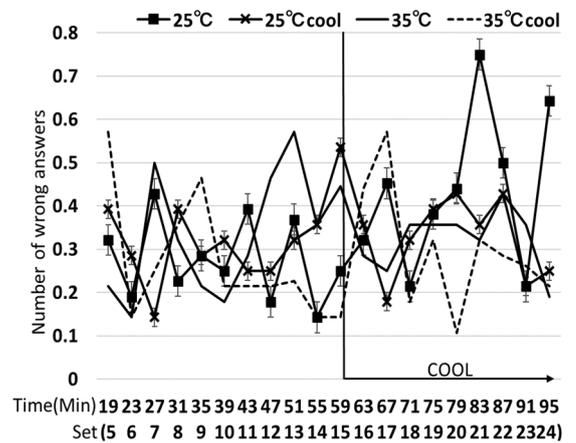
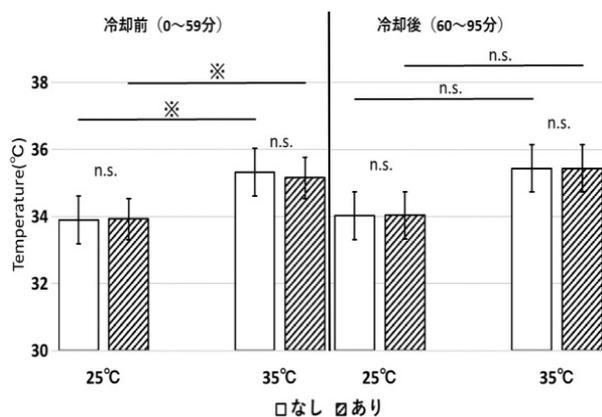


Fig. 5 誤答数の経時変化

3. 2. 平均皮膚温・耳内温

2 室温条件下、冷却は平均皮膚温への影響はなかった (Fig. 6, 7)。有意差検定の結果、室温の主効果のみ有意であった ($F(1, 24) = 15079.96, p < .01$)。冷却の主効果 : $F(1, 24) = 0.32, n.s.$; 相互作用 : $F(1, 24) = 0.08, n.s.$ 冷却前の平均皮膚温も同じく、室温の主効果 ($F(1, 48) = 263.58, p < .01$) のみ有意であり、冷却の主効果 ($F(1, 48) = 0.86, n.s.$) また交互作用はなかった ($F(1, 48) = 1.52, n.s.$)。

耳内温に関して、25°Cの室温下では2冷却条件下で、実験前後の体温に大きな変化は見られなかった。35°Cの室温では、高温環境による体温上昇の影響で実験前後に差が見られたが、冷却あり条件下の体温上昇度は冷却なし条件下の上昇度と差がなかったため、冷却は耳内温に影響をしなかったと考えられる (Fig. 8)。



※ : $p < .05$; n.s.: nonsignificant difference.

Fig. 6 平均皮膚温

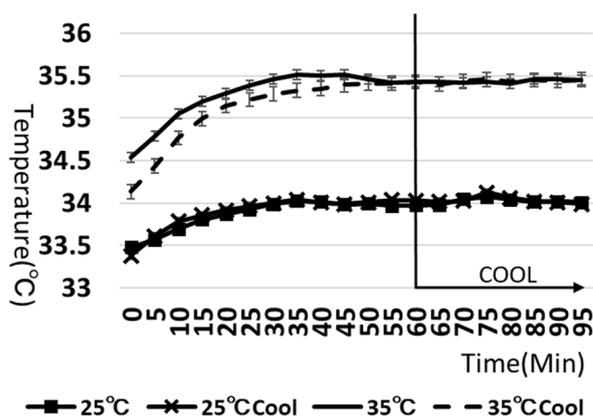
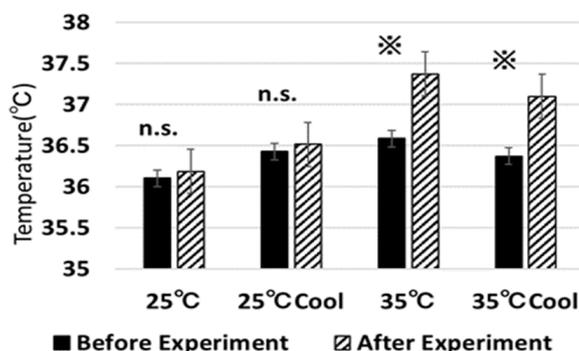


Fig. 7 平均皮膚温度の経時変化



※ : $p < .05$; n.s.: nonsignificant difference.

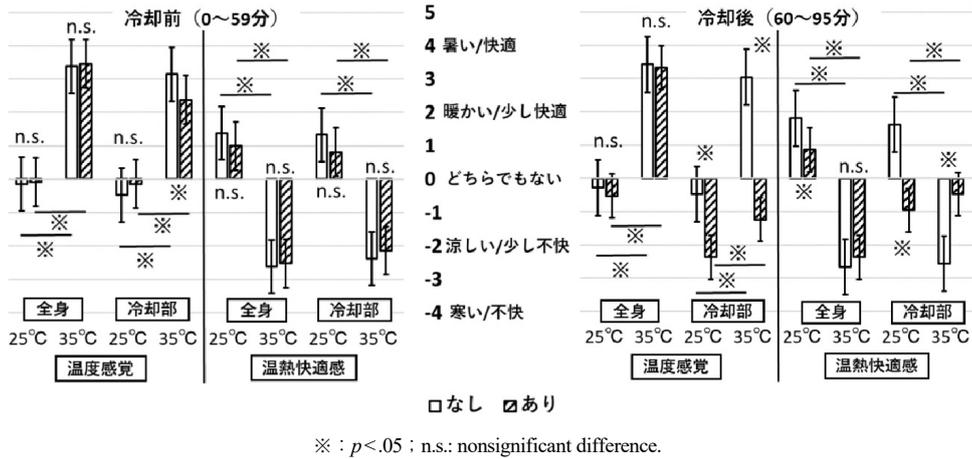
Fig. 8 実験前後の耳内温

3. 3. 温度感覚・温熱快適感 (Fig. 9, 10)

全身温度感覚については、どの室温条件下でも大きな変動は見られなかった。冷却前後とも室温の主効果（前： $F(1, 20) = 507.18, p < .01$ ；後： $F(1, 8) = 796.84, p < .01$ ）は有意だった。冷却の主効果（それぞれ $F(1, 20) = 1.67, n.s.$ ； $F(1, 8) = 2.54, n.s.$ ）及び相互作用はなかった（それぞれ $F(1, 20) = 0.02, n.s.$ ； $F(1, 8) = 0.04, n.s.$ ）。

冷却部温度感覚に関しては、2室温条件とも冷却後に冷感が有意に増加することが示された。分散分析の結果、相互作用（ $F(1, 8) = 59.70, p < .01$ ）が有意であり、2つの室温グループにおける冷却の単純主効果が

有意であった（25°C： $F(1, 8) = 86.49, p < .01$ ；35°C： $F(1, 8) = 409.14, p < .01$ ）。また、冷却条件の2グループとも室温別に有意差が見られた（冷却なし： $F(1, 8) = 272.49, p < .01$ ；冷却あり： $F(1, 8) = 31.14, p < .01$ ）。冷却前、35°C・冷却あり条件下の温度感覚はより変化が大きく、同室温下の冷却なし条件との差があった（ $F(1, 20) = 5.46, p < .05$ ）。この差は、冷却あり条件の初期温度感覚がより低かったためである。その原因として、皮膚と接触する部分が金属製であるため、冷却していない時でもわずかに冷たさを感じる事が考えられる。さらに、高温環境下では冷感をより感じやすいため、温度感覚が低くなったと思われる。



※ : $p < .05$; n.s.: nonsignificant difference.

Fig. 9 温度感覚・温熱快適感

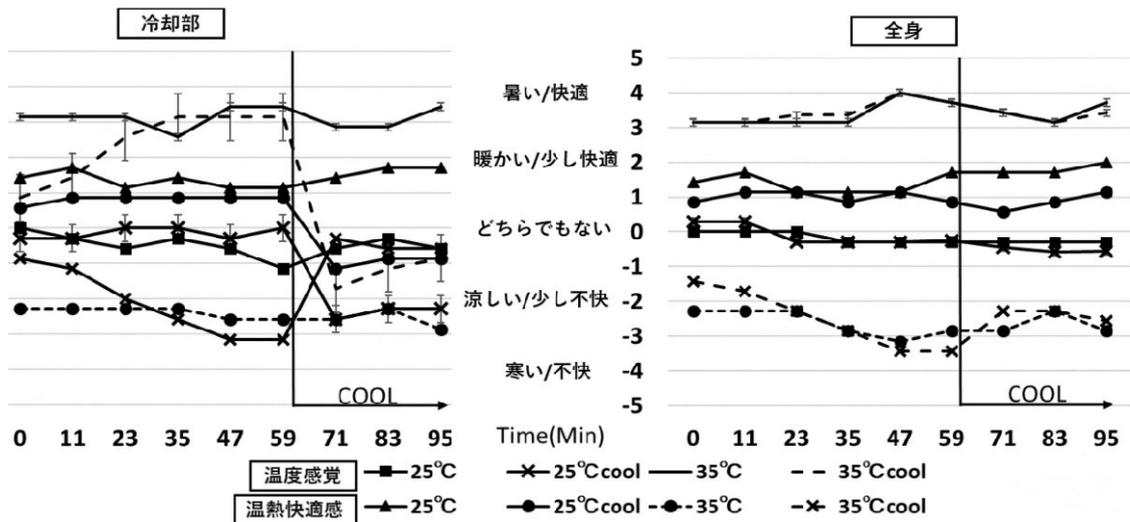


Fig. 10 温度感覚・温熱快適感の経時変化

25°Cの室温における全身温熱快適感は、冷却開始まで大きな変動がなかった。35°Cの室温下では、時間の経過とともに不快感が増加していた。冷却前では、室温の主効果のみ有意だった ($F(1, 20) = 346.72, p < .01$)。冷却後、35°Cの室温下での温熱快適感が少し改善する傾向があった。25°Cの室温では、冷却ありの快適性が低い結果を得た (Fig. 13, 14)。有意差検定の結果、交互作用が見られ ($F(1, 8) = 18.78, p < .01$)、25°Cの室温において冷却の単純主効果が有意であった ($F(1, 8) = 22.22, p < .01$)。また、冷却なし・あり群において室温別に有意な差が見られた (冷却なし : $F(1, 8) = 490.89, p < .01$; 冷却あり : $F(1, 8) = 256.89, p < .01$)。

冷却部に関して (Fig. 15, 16)、各条件下での冷却前の変化は全身快適感とほぼ同じであり、室温の主効果は見られた ($F(1, 20) = 251.28, p < .01$)。冷却後、35°Cの室温下での快適感是有意に向上した ($F(1, 8) = 161.33, p < .01$)。25°Cの室温では、冷却時により不快に感じ、有意差があった ($F(1, 8) = 243.00, p < .01$)。この結果は、冷却中に冷却部の温度感覚が「寒い」に近くなり、そのため、後頸部の不快感が増加した。そして、局所の不快感により全身の不快感が引き起こされたと考えられる。なお、冷却中2冷却条件では室温別に有意差があった (冷却なし : $F(1, 8) = 645.33, p < .01$; 冷却あり : $F(1, 8) = 8.33, p < .05$)。

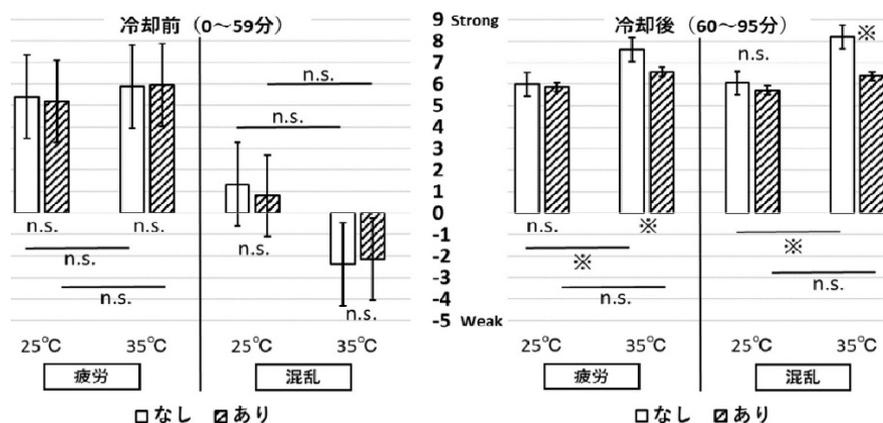
3. 4. 疲労度・混乱度 (Fig. 11, 12)

TMS 問診による疲労感については、冷却の主効果が見られ ($F(1, 8) = 6.07, p < .05$), 35℃の室温下での疲労感が冷却により有意に軽減された。また、冷却なし条件下でも室温による差も見られた ($F(1, 8) = 22.45, p < .01$)。冷却前では差がなかった。

混乱度においても (Fig. 19, 20), 冷却前のどの条件においても差がなかった。冷却後には相互作用が見られた ($F(1, 8) = 10.68, p < .05$)。35℃の室温下では、冷却の単純主効果が見られ、混乱度が有意に軽減された ($F(1, 8) = 32.09, p < .01$)。そして、冷却なし条件下でも室温による差が有意であった ($F(1, 8) = 45.00, p < .01$)。

3. 5. 総発汗量・心拍

総発汗量は、冷却の影響は見られず、室温の主効果のみが認められ ($F(1, 24) = 13.82, p < .01$), 冷却なし・あり条件において25℃と35℃の有意差はあった。心拍に関しては (Fig. 13), 相互作用が見られ ($F(1, 140) = 13.72, p < .01$), 2室温とも冷却ありの心拍は有意に低かった (25℃ : $F(1, 140) = 76.43, p < .01$; 35℃ : $F(1, 140) = 195.43, p < .01$)。また、2冷却条件において室温の単純主効果も有意だった (冷却なし : $F(1, 140) = 1442.13, p < .01$; 冷却あり : $F(1, 140) = 1071.78, p < .01$)。



※ : $p < .05$; n.s.: nonsignificant difference.

Fig. 11 疲労度・混乱度

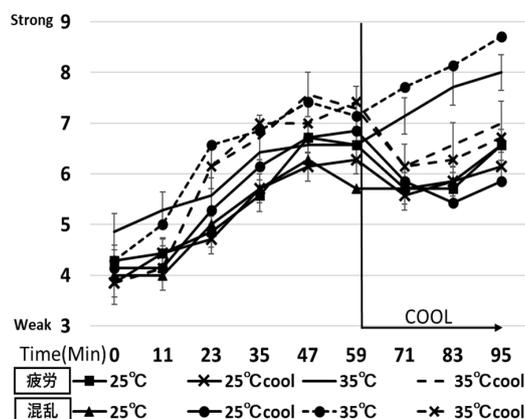
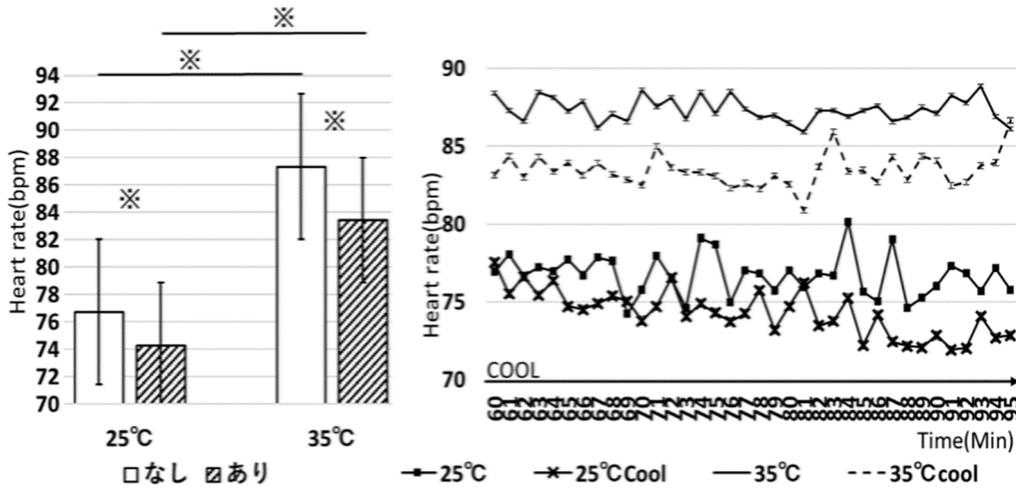


Fig. 12 実験前後の耳内温



※ : $p < .05$

Fig. 13 心拍数

4. 考察

今回は、25°Cの室温下において局部冷却により反応時間が短縮することが示された。また、35°Cの室温における反応が早くなる傾向がみられたため、精神作業能に後頸部の局部冷却の有効性がある可能性が示唆された。

高体温時には認知機能が低下していることは多くの研究に指摘されており、特に暑熱環境下の高核心温は注意持続性に関する認知機能の低下を引起す要因である (Simmons et al., 2008)。また、Gaouaら (2011) は、暑熱環境下における直腸温、前額皮膚温及び耳内温の上昇した際の認知機能が低下することを認めた。本研究において、35°Cの室温条件下では耳内温及び平均皮膚温は冷却による低下は認められなかったため、局所冷却は体温には影響していないことが示唆された。温熱ストレスに加えて、長時間の精神作業により脳に負担がかかったためと思われる。また、発汗は作業中の蒸し暑さや不快感を増加させ、集中を妨げると指摘されている (庄司ら, 2003)。今回は、冷却ありと冷却なしの条件下での発汗量に差はなく、冷却中の全身快適感が「やや不快」程度で変動していることから、発汗の抑制はできず、それによって引き起された不快感の影響で反応時間の差が見られなかったと考えられる。

一方で、25°Cの室温において2冷却条件下の発汗量にも有意差はなかったが、35°Cの室温下の発汗量よりも少なく、体温の過度な上昇も見られず、冷却中の全身快適感が「やや快適」～「どちらでもない」のレベルであったため、集中力が高まり、反応時間が短くなったと考えられる。

また、安静時に自覚的な温熱負荷が高くなると認知機能にも影響を及ぼす (風間ら, 2012)。温熱環境に対する不快感が上昇すると、脳の活動が低下するため、作業中の温熱快適感の把握は重要である。快適感が得られやすい部位については、温度感受性ニューロンが存在しており、温度に敏感な後頸部を冷却した (実験中、冷却部と装置表面の温度は、冷却装置から15分毎に自動的に記録された (Fig. 14))。35°Cの室温下では、冷却10分目から温度感覚と不快感の増加傾向が見られ、冷却部の温度もほぼ同様な傾向を示し、冷却してから15分後に上昇し始めた。これは刺激温度に慣れたためだと思われ、今回の高温環境下での冷却温度が不足であることが示唆された。

そして、快適感と関係している温冷感に関しては、暑さや寒さを感じるほど集中できなくなる (平野ら, 2016)。25°Cの室温では全身温度感覚は35°Cの室温より中立温度 (0) に近く、先行研究と一致する結果が得

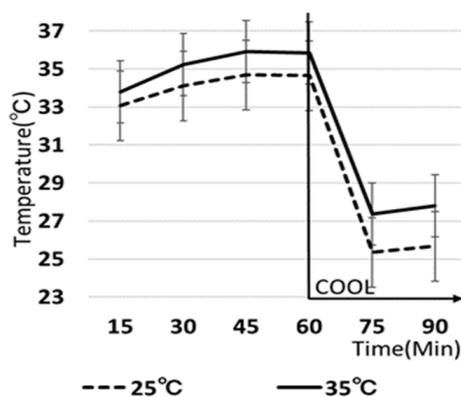


Fig. 14 冷却部の皮膚温度の経時変化

られた。35℃の室温では、冷却部の温度感覚が中立温度 (0) 近くまで下がったが、全身はほぼ変化しなかった。そのため、集中が妨げられたと思われる。さらに、25℃・冷却ありの条件では、冷却刺激感や不快感が少し緊張感を生じさせ、課題に集中できたために反応が早くなったと考えられた。

精神的ストレスを評価できる心拍の結果について、2室温条件とも冷却時の心拍が有意に低くなる傾向が認められた。心拍で解析したLF/HF値も同様な結果が示され、2室温条件とも冷却時に低いLF/HF値が得られた (25℃: 5.79; 25℃ cool: 4.20; 35℃: 7.56; 35℃ cool: 6.71)。平松ら (2019) の研究により、精神負荷が大きくなると副交感神経の活動が抑制されることから、冷却中の副交感神経が優位になっており、心理的負荷が小さくリラックス状態になっている。そのため、疲労度と混乱度が低くなり、特に35℃の室温における軽減効果が明瞭であった。また、西山ら (2010) の研究では、冷刺激はLF/HF比を抑制することを報告した。本研究では同様の結果が得られ、局所冷却は交感神経の活動を抑制することを示した。

一方、集中力の低下に伴い反応時間が遅くなる原因としては、モチベーションの低下が重要な要因とされている。特に、不快な高温環境下での長時間にわたる単純な課題の継続は、モチベーションの低下を引き起こす可能性があるとして述べられている (Bateman, 1981)。加えて、長時間同じ姿勢での精神作業は、首にストレスが生じさせるとともに自律神経に負荷をかけると推

測される。適切な冷却は、首の緊張感を緩和することができる一方で、同じ部位への長時間の冷却は血管の収縮を引き起こし、交感神経が優位に活動する可能性がある。そのような観点から、今回のフィードバック制御冷却法は過度な冷却を防止でき、精神作業で生じたストレスを緩和すると同時に、ある程度の緊張感を維持することができた。加えて、不快感の低下により作業効率が高くなったと考えられる。

以上より、ペルチェ素子による局所冷却は精神作業時の注意・切り替えに関する機能を維持することができると示唆された。興味深いことに、35℃と25℃の環境温度の両方でその効果が確認された。まず、高温環境 (35℃) においては、頸部局所冷却が環境温熱負荷による不快感や疲労を軽減したのと考えられる。一方、25℃の環境においては、西原 (2003) は正常体温時の頸部冷却が脳温を下げる可能性を示していることから、今回の冷却は脳冷却効果をもたらし、加えて冷却部で感じられたわずかな冷却刺激感が脳を覚醒させ、反応速度が向上したと推察する。今後は、個人の快適状態の推定及び各指標間の関連性を解明するために、生理指標の脳波及び脳血流量の測定が必要である (芝崎ら, 2016)。一方で、本研究は、将来的に教育現場への導入を見据えた基礎研究としてまず実験内での調査を行った。ただし、生徒を直接実験室に呼ぶのは実施上の困難があるため、今回は男性大学生を対象にした。次の段階では、今回の結果を基に、児童生徒を対象に学校での実地調査を実施し、その結果を比較分析する予定である。

5. まとめ

本研究では、温度制御を自由にプログラミングできるペルチェ素子を用いた後頸部の局所体冷却を実施し、持続的な精神作業中の心理指標 (温度感覚、温熱快適感、疲労感、混乱度) 及び生理指標 (平均皮膚温、耳内温、心拍) から認知機能にどのような影響を与えるかを検証した。結果として、25℃の環境下において反応時間が短縮されることが示された。一方、疲労度・混乱度から、35℃の環境下での軽減が示された。冷却部の温度変化 (Fig. 14) を確認すると、冷却15分目から慣れにより皮膚温度が若干上昇する傾向が見ら

れるものの、その後の15分間での温度変動は0.5℃以内に収まっている(25℃環境: +0.33℃; 35℃環境: +0.43℃)。これはペルチェ素子の温度制御機能が設定された冷却温度を基準に、皮膚温の変化に応じて自動調整した結果である。この制御により、今回冷却の後半でも冷感が感じられ、疲労や混乱度の低下とともに集中力が向上したと考えられる。

この結果から、ペルチェ素子冷却法が持つ温度制御性と冷却の持続性は、精神的ストレスの軽減・認知機能の維持に役立つ可能性が示された。将来的に教育現場での利用を考えると、学習意欲の促進や学習の効率向上にペルチェ素子冷却法が有効であると期待できる。また、生徒間で快適感が異なる個人差を解決することで、公平な学習環境を提供することが可能となる。加えて、生徒が自身の判断で冷却装置を使用することにより、体調管理の自主性や環境適応能力の育成が期待される。さらに、冷却装置を使用することで、体温調節の重要性などに関する教育の機会ともなる。今後の活用においては、このペルチェ素子冷却装置は、頸部に装着して電源ボタンを押すだけで動作し、さらにプログラム温度調整が可能であるため、地域や学年などの制約がなく、簡単に使用できることから、省エネルギーの推進にも寄与し、持続可能なエネルギー利用と環境の実現に貢献することが期待される。以上より、ペルチェ素子による冷却法は、日常生活、教育現場、そして社会全体にポジティブな影響をもたらすと期待される。

引用文献

- Bateman, R. P. The effects of increased ambient temperature on dual task performance. *Proc Hum Factors Soc Annu Meet*, 25, 1981, 379-383.
- Gaoua N, Racinais S, Grantham J & El Massioui F. Alterations in cognitive performance during passive hyperthermia are task dependent. *Int J Hyperthermia*, 27, 2011, 10-19.
- 長谷川博. スポーツにおける実践的暑さ対策とその応用. *NSCA ジャパン機関誌*, 25 (6), 2018, 2-10.
- Hasegawa H, Meeusen R, Takatsu S, Yamasaki M. Exercise performance in the heat -Possible brain mechanisms and thermoregulatory strategies-. *Adv Exerc Sports Physiol*, 13, 2008, 81-92.
- 平松将, 柳原大樹, 馬場勇太, 伊賀崎伴彦. 作業課題中の精神作業負荷と心拍変動に関する基礎的研究. *情報関係学会九州支部連合大会講演論文集*, 2019, 79.
- 平野葵, 倉渕隆, 飯野由香利. 小学校における教室環境が学習効率に与える影響に関する基礎的研究. *空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集*, 8, 2016, 397-400.
- wang RL, Liao WJ & Chen WA. Optimization of energy use and academic performance for educational environments in hot-humid climates. *Building and Environment*, 222, 2022.
- 加藤秀弥, 伊香賀俊治, 村田義郎, 清水賢, 市原真希, 張本和芳, 岡崎愛, 関紅美花. 生徒の活動習慣と教室環境が学習効率に及ぼす影響についての実態調査. *空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集*, 8, 2018, 165-168.
- 川久保俊, 出口清孝, 佐藤直哉. 環境実測, 数値流体解析, 質問紙調査に基づく教室内温熱環境と学生の集中力の時空間分析. *空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集*, 8, 2014, 25-28.
- 風間彬, 高津理美, 長谷川博. 体温上昇が持久的運動時における認知機能に及ぼす影響. *体力科学*, 61 (5), 2012, 459-467.
- 文部科学省. 省エネルギー推進のための手引き～省エネのすすめ方・つづけ方～. 2019.
https://www.mext.go.jp/component/a_menu/education/detail/_icsFiles/afieldfile/2019/05/09/1416432_001.pdf (2022/7/5 閲覧)
- 中川晃, 石渡貴之. 暑熱環境か運動時における体温調節機能と認知機能, 運動パフォーマンスの変化について. *立教SFR —大学院生研究— 2014年度研究成果報告書*, 2014.
https://www3.rikkyo.ac.jp/research/initiative/aid/interior/SFR/fy14_seika-koukai/_asset/pdf/14_insei_22.pdf (2022/7/8 閲覧)
- 中田大貴. 暑熱環境の違いが運動時のヒト脳認知機能に及ぼす影響. *デサントスポーツ科学*, 38 (7), 2017, 17-27.
- 南谷晴之. 疲労とストレス. *バイオメカニズム学会誌*,

- 21 (2), 1999, 58-64.
- 西原直枝, 長谷部ヤエ. 局所冷刺激に対する人体反応特性の部位差. 日生氣誌, 39 (4), 2003, 107-120.
- 西山保弘, 工藤義弘, 矢守とも子, 中園貴志. 異なる水温落差が自律神経活動に与える影響. 理学療法学 Supplement, 37 (2), 2010, O1-206.
- 芝崎学, 難波真理, 中田大貴. 暑熱環境下における聴覚情報処理および高次認知機能の評価. デサントスポーツ科学, 37 (7), 2016, 82-91.
- Shibasaki M, Namba M, Oshiro M, Kakigi R & Nakata H. Suppression of cognitive function in hyperthermia; From the viewpoint of executive and inhibitive cognitive processing. Scientific Reports, 7(1), 2017, 43528.
- 庄司卓郎, 江川義之, 輿水ヒカル. 環境温度の違いが作業パフォーマンスに及ぼす影響. 産業安全研究所特別研究報告, 28, 2003, 49-61.
- 鈴木峻, 清水祐二, 清水鉄也. 熱中症予防に対する飲料水の効果的な摂取方策に関する検証. 消防科学セーフティレポート, 57, 2020, 80-91.
- Wargocki P & Wyon DP. The Effects of Moderately Raised Classroom Temperatures and Classroom Ventilation Rate on the Performance of Schoolwork by Children (RP-1257). HVAC&R RESEARCH, 13(2), 2007, 193-220.
- 安岡絢子, 都築和代. 異なる温熱環境が生理心理量と作業効率に及ぼす影響. 一般社団法人日本家政学会研究発表要旨集, 69 (0), 2017, 235.
- Zomorodian ZS, Tahsildoost M & Hafezi M. Thermal comfort in educational buildings: A review article. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 59, 2016, 895-906.