

原著論文

相変化材料を用いた温熱調節寝具における寝心地評価

橋本 一馬*, 青井 政貴*, 吉田 宏昭**, 上條 正義**

* 信州大学大学院, ** 信州大学

Sleep Comfort Evaluation in Bedding that Utilized Phase Change Materials (PCM)

Kazuma HASHIMOTO*, Masataka AOI*, Hiroaki YOSHIDA** and Masayoshi KAMIJO**

* Graduate School of Shinshu University, 3-15-1 Tokida, Ueda-shi, Nagano 386-8567, Japan

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

Abstract : The purpose of this study is to reveal the bedding influence degree to quality of sleep. This bedding utilized Phase Change Materials (PCM). We carried out two experiments. Firstly, we experimentally confirmed thermal properties of the PCM. Secondly, we carried out overnight sleep experiment in hot and cold environment. We prepared the PCM bedding and normal bedding that is commercially-supplied. Consequently, the PCM had been the property of cold tactile sensation rather than the normal bedding. From overnight sleep experiment, we found that subjects fell asleep earlier by using the PCM bedding. In cold environment, subjects' skin humidity was low and felt bad after sleep in the PCM bedding sleep. We concluded the PCM has a special endothermic property to deprive the temperature of skin surface.

Keywords : PCM, Sleep, Comfort

1. はじめに

睡眠は脳機能, 身体諸機能を健全に保つために必要不可欠であり, 生活の質を向上させるための役割を担っている. 良好な睡眠生活を送るためには, 睡眠環境を整えることが重要である. 睡眠環境の中でも温湿度, 音, 光は, 睡眠に強く影響する三大環境要因であるとされており, 温湿度が25℃50%RH程度, 音は40dB以下, 照度は30lx以下に調整することが望ましいとされている [1]. この他の要因として, 寝具が挙げられる. 寝具は布団, ベッドマットレス, 毛布, タオルケット, シーツ, 枕, ナイトウェアなどがある. 寝具は直接肌に触れることから接触感覚や寝床内気候の快適なものが必要とされる. しかし, 温湿度, 音, 光などの物理的な要因と睡眠の関係を調査した研究に比べ, 寝具と睡眠の関係を調査した研究は少ない.

ベッドマットレスが人に及ぼすと考えられる物理的要因は, 温熱特性, 接触特性 (肌触り), 弾性特性 (硬さ) である. これらの要因中の温熱特性, 接触特性は, 身体に直接接触することからベッドパッドと上掛けおよび枕パッドによって改善が可能である. またこれらのパッド類は生活者一人ひとりに合ったものを供給でき, それぞれの生活者が, 好みに合わせて買い換えることが容易である.

現在, 発熱・保温などの機能を備えた相変化材料を含んだ繊維の開発が広い分野で進められ, 肌着やスポーツウェアにとどまらず, スーツやジーンズ, さらには宇宙服の素材にと多くの繊維製品に活用されている.

睡眠時の快適な寝床内気候は温度32~34℃, 相対湿度50±5%といわれている [2]. 夏の暑熱環境, 冬の寒冷環境

において寝具は, 快適な寝床内気候を確保するための一助となる. 暑熱および寒冷環境において温度を一定温 (32±1℃) に調節する機能をもつといわれる相変化材料のマイクロカプセルが混入された繊維素材 (以後, PCM と称する) によって寝床内気候が制御できれば, 良い睡眠が確保されることになる. マイクロカプセル内にパラフィンワックスが含有されており, そのワックスが周囲の環境変化に合わせて状態変化を起こすことによりそれ自体が温度を一定に保つ機能を持つといわれている. 本温熱特性を確認するための実験を行った結果, PCM混入試料はPCMを含まない試料と比較し, 接触冷感特性が高く, 熱容量が大きいことがわかった. このことから, PCMを寝具に用いることで室内気候に違いがあっても, 寝床内の温熱環境を制御し, 良い寝心地が得られると考えられる. そこでPCMを含んだベッドパッド, 上掛けおよび枕パッド (以後PCM寝具と称す) とPCMを含まないベッドパッド, 上掛けおよび枕パッド (以後ノーマル寝具と称す) を作成した. これらの寝具で実際に睡眠実験を行うことにより, 寝具の温熱特性の違いが寝心地に与える影響を人の生理・心理反応の計測から求められる睡眠の質の評価から考察することを本研究の目的とした.

人の睡眠状態を評価する場合, 睡眠中の生理的变化を脳波から計測する事が一般的な方法である. 脳波は覚醒水準が上昇すると周波数が上がり低振幅化し, 反対に覚醒水準が低下するほど周波数が下がり高振幅化する. 睡眠の深さとともに脳波が変化することから, 米国際学会において1968年に睡眠段階の国際的判定基準が策定されている [3]. 表1に睡眠段階判定基準を示す. この判定基準では, 脳波, 眼球運動, 顎のオトガイ筋の筋電位の3つの指標を同時に測定することが必要とされ, これはPolysomnography (PSG) と呼ばれて

いる。PSGは、ヒトの睡眠に関する生体現象を記録し、睡眠の深度および経過を経時的に記録する方法であり、複数の生理指標（脳波、眼電図、筋電図）の同時記録が必要である。

表1 国際睡眠段階判定基準 [4]

分類	状態	脳波, 眼球運動, 筋電図
WAKE	覚醒している状態.	α 波と低電位で様々な周波数の脳波が混在する. まばたきや高振幅で持続性の筋電図が見られる.
NON-REM (Non-Sleep)	STAGE 1 (Light Sleep)	脳波に占める α 波の割合が50%未満となり, 比較的低電位の様々な脳波が混在する. 睡眠の初期には緩やかな眼球運動が見られる.
	STAGE 2	0.5秒以上持続する睡眠紡錘波と0.5秒以上のK複合波が出現し, STAGE 3, 4の定義を満たすだけの高振幅徐波は認められない.
	STAGE 3 (Deep Sleep)	2Hz以上, 振幅75 μ V以上の高電位の徐波(δ 波)が判定区間の20%以上を占める.
	STAGE 4	2Hz以上, 振幅75 μ V以上の高電位の徐波(δ 波)が判定区間の50%以上を占める.
STAGE REM (REM Sleep)	大脳をノンレム睡眠の状態から目覚めさせる役割を持つ. 身体はぐっすりしているが脳は覚醒に近い状態である.	比較的低電位で様々な周波数の脳波が混在し, 高速眼球運動が共存する段階. 骨格筋の緊張が著しく低下し, オトガイ筋の筋電位は一晩のうち最低水準まで低下する.
MT (Movement Time)	寝姿勢の変化や寝返りなどの体動が生じている.	体動を伴う筋緊張やアーチファクトで, 脳波と筋電図記録が判定区間の50%以上判定不能である.

2. 実験試料

表2, 表3に本研究で用いた実験試料の仕様を示す. 本研究では, PCM材料としてOutlast®を用いた. 低価格で, かつどのような繊維とも相性がいいという特徴から, PCMと組み合わせる繊維としてポリエステルを選択した. 試料を統一させるためノーマル寝具においてもポリエステル繊維を使用している. PCM入ベッドパッドはPCMが混入したポリエステル繊維の不織布とポリエステルの中綿を綿の布で覆っている構造を持つ. なお枕パッドはベッドパッドと同様の組成である. PCM入上掛けパッドは, PCMが混入したポリエステル繊維とポリエステルだけの繊維による中綿を綿の布で覆った構造を持つ. PCM無上掛けは, ポリエステル繊維の中綿で構成されている.

表2 実験試料(上掛け)組成

	ノーマル 上掛け	PCM 上掛け
PCM混率	0%	アウトラストポリエステル綿50%混合
表地	綿100%	綿100%
裏地	綿100%	綿100%
表地・裏地 番手	タテ40 ヨコ40	タテ40 ヨコ40
表地・裏地 密度	タテ133/インチ ヨコ72/インチ	タテ133/インチ ヨコ72/インチ
生地組成	平織	平織
詰め物	ポリエステル100%	ポリエステル100%
重量	約1282.1g	約1229.8g
厚み (50gf荷重)	8.8mm (2.28mm)	9.49mm (2.03mm)
密度	約0.05g/cm ³	約0.05g/cm ³
定常熱伝導率	12.78 W/cm·K	10.1 W/cm·K

表3 実験試料(ベッドパッド・枕パッド)組成

	ノーマル ベッド・枕パッド	PCM ベッド・枕パッド
表地	綿100% 平織	綿100% 平織
表地密度	タテ133/インチ ヨコ72/インチ	タテ133/インチ ヨコ72/インチ
表地番手	タテ40 ヨコ40	タテ40 ヨコ40
裏地	ポリエステル65% 綿35%	ポリエステル65% 綿35%
裏地密度	タテ90/インチ ヨコ60/インチ	タテ90/インチ ヨコ60/インチ
裏地番手	タテ45 ヨコ45	タテ45 ヨコ45
詰め物	ポリエステル100%	ポリエステル100% 不織布(PCMシート入り)
重量	約725.1g (ベッドパッド)	約897.1g (ベッドパッド)
厚み (50gf荷重)	9.43mm (2.77mm)	9.59mm (3.55mm)
密度	約0.04g/cm ³	約0.05g/cm ³
定常熱伝導率	10.29 W/cm·K	9.72 W/cm·K

上掛けに含まれる中綿の単繊維の断面を走査型電子顕微鏡(SEM)を用いて撮影した. ノーマルを図1にPCMを図2に示す. SEM画像で確認したところポリエステル単繊維の太さはノーマルが24.9 μ m, PCMは28.1 μ mであった.

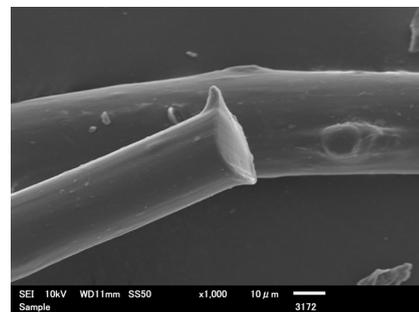


図1 ノーマル上掛け(単繊維の断面写真)

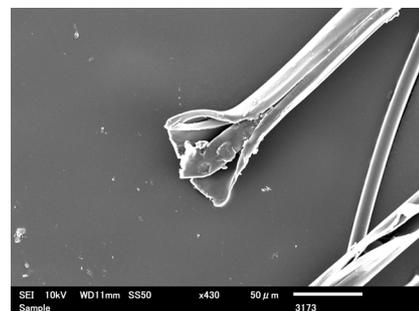


図2 PCM上掛け(単繊維の断面写真)

相変化材料を用いた温熱調節寝具における寝心地評価

3. 実験

3.1 実験① 温熱特性実験

PCM寝具がどのような温熱特性を持っているのか明らかにする実験を行った。

ベッドパッドに対する実験試料として、元々のベッドパッドから詰め物のみを抜いたPCM入不織布を綿の表生地と裏生地地で挟んだ試料を用いた。比較対象のベッドパッドとして、綿の表生地と裏生地二枚を重ねたものをノーマルとした。上掛けに対する試料は、中綿のみを実験試料とした。PCM入中綿とPCM無中綿の2種類について比較した。中綿の実験については、中綿を押しつぶし、見かけの厚さを無くした状態で測定した。

3.1.1 実験内容

温熱特性実験は標準状態(温度20℃, 湿度65%)に設定した恒温恒湿室で行った。実験イメージを図3に示す。精密迅速熱物性測定装置(Kawabata Evaluation System: KES-F7: カトーテック製)を利用し、発砲スチロールを試験台としてその上に試料を置き、35℃の熱板(有効測定面積: 50cm²)を試料の上に乗せた。熱板を35℃に保つために使用する電力量の推移の違いから両試料の温熱特性を評価した。ベッドパッド, 上掛けそれぞれ5回測定を行い, 平均を求めた。

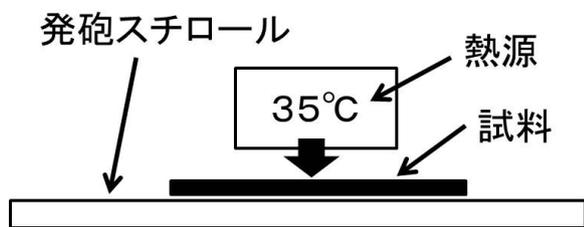


図3 実験イメージ

3.2 実験② 終夜睡眠実験

3.2.1 被験者

人が寝具から感じる寝心地は、性別、年齢、体型などにより異なることが予想される。そこで、本研究の被験者は体重/身長×身長で算出されるBody Mass Index (BMI) 値を基準にして標準的な体型 (BMI 値が18.5~25) をした男子に限定した。被験者は健常で、睡眠障害のない男子大学生・大学院生5名であった。表4に被験者の体格データを示す。被験者には実験開始前のコーヒー、アルコール等の飲用、過度の運動を避けるように事前に教示した。また、睡眠の際の被験者の服装は綿60%, ポリエステル40%の半袖Tシャツ、短パンで統一した。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の承認を得て、事前に本研究の内容、研究中断の権利があること、対象者の個人情報明らかにしないことを書面で説明し、同意を得た上で実験を行った。

表4 被験者体格データ

被験者の数 (人)	5
身長 (cm)	173.0 ± 0.1
体重 (kg)	61.2 ± 7.3
BMI 値	20.4 ± 1.5

3.2.2 測定項目

3.2.2.1 Polysomnography

睡眠の状態を客観的・定量的に評価するために、被験者5名に対してPSGを測定した。脳波 (electroencephalogram: EEG) は、国際10-20点法にしたがってC3, C4, 左右耳朶A1, A2を基準部位とする単極導出法で導出した。眼電図 (electrooculogram: EOG) は左右水平方向の眼球運動を、左眼角外1cm斜上方, 右眼角外1cm斜下方に装着した電極と左右耳朶A1, A2を基準部位とした単極導出法で導出した。筋電図 (electromyogram: EMG) は、オトガイ筋上に2個の電極を3~4cm離して装着し、双極誘導で導出した。ボディアースは、鎖骨付近とした。電極は皿形生体電極 (ACT生体電極, AC-P102, (デジテックス研究所)) に生体信号測定用ペーストを塗付したものを使用し、電極のはがれを防ぐために、電極の上から伸縮性のあるサージカルテープを貼付した。生体信号は生体アンプ (POLYMATE AP1132 (TEAC社)) で増幅し、サンプリング周波数500HzでA/D変換してコンピュータに記録した。採取したPSGデータから、睡眠の深さを示す睡眠段階の判定を行った。

睡眠段階は、各脳波出現割合, 振幅, 眼球運動, オトガイ筋活動により総合的に判定される。睡眠深度の判定はRechtschaffen & kalesの国際判定基準 [4] に従い、睡眠脳波解析ソフト (Sleep Sign Ver2 (キッセイコムテック社)) を用いて30秒ごとの睡眠段階を判定した。睡眠段階はstageW (MTも含む), stageR, stage1からstage4までの6段階で判定した。解析区間は実験開始から6時間とした。解析区間中に現れた睡眠深度を示す睡眠ステージの経時データについて、StageW (MTも含む) は0, StageREMは0.5, Stage1は1, Stage2は2, Stage3は3, Stage4は4とそれぞれ値付けした経時データから試料別に平均値を算出し、さらに移動平均によって10データ毎に再度平均化した。StageREMを0.5と値つけることについては賛否があるところではあるが、Stage1と覚醒の間の状態と仮定して今回は0.5とした。

全睡眠におけるstageの判定数の和に対してのstageW以外のstageの出現割合を睡眠効率として算出し、試料別に比較を行った。

3.2.2.2 皮膚表面温湿度, 衣服内気候, 寝床内温度

温湿度センサ (ハイグロクロン (KNラボラトリーズ社製)) を用いて、皮膚表面温湿度, 衣服内気候を測定した。このセンサは超小型温湿度記録計 (温湿度ロガー) であり、一定間隔で温湿度を記録することができる。表5に実験で用いた温湿度センサの使用を示す。図4に温湿度センサの貼付方法を示す。胸部付近に、それぞれ貼付した。0:00に測定を

開始し、2分ごとに温湿度データを記録するように設定した。片面がセンサ部分になっており、衣服内気候はセンサ部分が肌に対して上向きになるように添付し測定した。またセンサ部分を肌に直接触れる形で添付し、皮膚近傍領域における温度（以後皮膚表面温度と称す）と湿度（以後皮膚表面湿度と称す）を測定した。

また熱電対と温度データロガー（HIOKI社製）を用いて寝床内温度を同時に計測した。睡眠中の被験者の真下に首から腰にかけて約20cm感覚で3chの熱電対をベッドパッドに直接貼り付けた。センサ部分はサージカルテープで覆うようにして添付した。

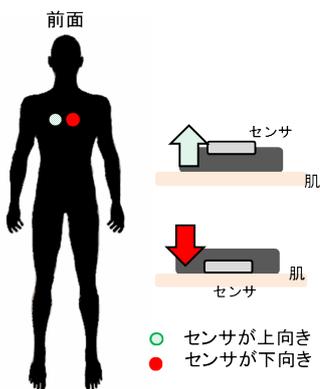


図4 温湿度センサの貼付方法

表5 温湿度センサの仕様

外形寸法・重量	[直径]約17mm×[厚さ]約6mm. [重さ]約3.3g
分解能	温度：0.1℃ 湿度：0.1%RH
温度精度	±0.5℃
湿度精度	±5%RH

3.2.2.3 心理反応測定

主観的な睡眠評価として、OSAによる睡眠に対する評価だけでなく、起床後の総合的な気分を調査することを目的として、Profile of Mood State (POMS)による気分検査を行った。POMSは被験者の一時的な気分・感情を調査するために開発された65の質問項目に対して5段階評価（0～4点）で答える質問紙法の検査である。POMSは精神医学、心療内科領域などで病態把握や治療効果の評価にも応用されており、その有効性が確かめられている[5,6]。POMSにより人の気分、感情に関する6つの因子（緊張・抑うつ・怒り・疲労・混乱）を測定できる。解析は、ダミーの質問項目を除く全ての項目について、尺度ごとに構成項目の得点を合計し素得点を算出した。

3.2.2.4 睡眠中の動作解析

Actigraph（AMI社製）によって対象者の睡眠中の動作を単位時間ごとに測定し、睡眠を評価した。重さは非常に軽量であり、非侵襲で簡単に装着でき、長時間連続測定ができる

腕時計式であることから睡眠・覚醒リズムの大まかな傾向の観察には有効な方法としてよく用いられている[7]。Actigraphは非利き腕に装着し、体動を計測した。Actigraphによる睡眠・覚醒判定はActigraphで測定された活動量をもとに、判定式を用いて行う。本実験では被験者の年齢などを考慮し、

$$\text{Cole式：} S = 0.00001 (404 \alpha n4 + 598 \alpha n3 + 326 \alpha n2 + 441 \alpha n1 + 1408 \alpha 0 + 508 \alpha 1 + 350 \alpha 2) \quad (1)$$

で睡眠を解析した。

ここでSは判定値を示し、 $S \geq 1$ で覚醒、 $S < 1$ で睡眠と判定される。 $\alpha n1, \alpha n2, \alpha n3, \alpha n4$ ：4分前、3分前、2分前、1分前のアクチグラフカウント数、 $\alpha 0$ ：判定される時点でのアクチグラフカウント数、 $\alpha 1, \alpha 2$ ：1分後、2分後のアクチグラフカウント数を指す[7,8]。解析に用いた指標は睡眠率である。睡眠率は全データに対する睡眠判定の割合を算出したものである。

3.2.3 実験内容

実験は恒温恒湿室にて暑熱環境と寒冷環境の2種類の環境下で行った。被験者には実験開始の1時間前に恒温恒湿室内に入室させ、環境に順応させた。入室後すぐに気分調査(POMS)を行わせた。記入後Actigraph、電極の装着を行った。波形の導出を確認後被験者にマットレスに横たわるよう指示した。暑熱環境は終夜一貫して28℃、50%RHとした。寒冷環境においては、都心部の冬場の寝室の気温変化[9]を参考に、0:00～5:00で初期値15℃から1時間ごとに1℃ずつ気温が下がり、5:00～8:00の間で15℃まで上昇するプログラムを組んで実験を行った。寒冷環境における平均風速は0.04m/sであった。5名の被験者で実験を行い、1試料につき1名あたり2回ずつ実験した。実験は順序効果を考慮し、ランダムな順番で試料を提示した。

4. 結果

4.1 実験① 温熱特性実験

熱板を置いてから3分間測定した時の、ベッドパッドの使用電力の時間推移の比較を図5に、上掛けの使用電力の時間推移の比較を図6に示す。180秒間の変化の平均値を求めて2つの平均値の差をt検定した結果、危険率1%で有意差が認められた。PCMの平均値を(●)で、ノーマルの平均値を(○)で図中に示した。図5、図6から、熱板を置いてから約2分間でPCM寝具はノーマル寝具に比べ使用電力量が高くなる結果となった。このことから、この2～3分間でPCM寝具は熱源からの吸熱量が多い可能性が考えられる。しかし、図5の結果が示すように、ベッドパッドに関して、ノーマルに比べPCMの消費電力が上回っているのは熱板接触直後から約2分間であり、それ以後は、吸熱に伴う電力量の上昇はみられなかった。PCMは熱源からの吸熱を行い熱平衡になることから、人が接触した際は冷やとした感触である可能性が示唆された。

相変化材料を用いた温熱調節寝具における寝心地評価

次に、熱平衡後の状態を観察するために、ベッドパッドに熱板を置き、3分間待った後、1分間測定を行った際のPCMとノーマルの使用電力の推移を図7に示す。60秒間の変化の平均値を求め、t検定を用いて有意差を求めた。その結果、PCMはノーマルを有意に下回って推移した。PCM寝具自体は熱源としばらく密着し、熱平衡状態が続くと、保温状態が保たれることが示された。

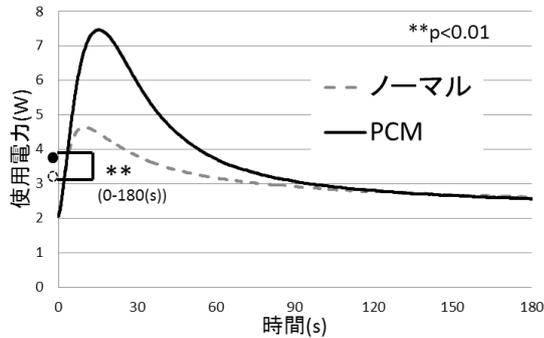


図5 ベッドパッドにおける使用電力量の推移 (N=5)

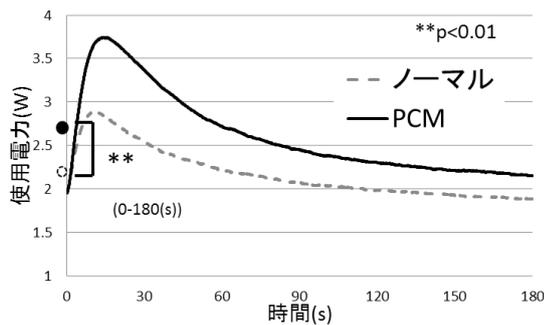


図6 上掛けにおける使用電力量の推移 (N=5)

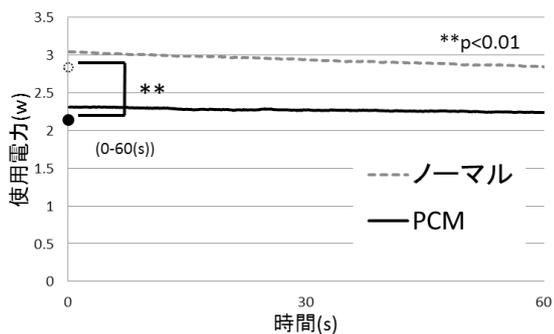


図7 ベッドパッドにおける使用電力量の推移 (熱平衡後, N=5)

これらの結果より、PCM寝具は接触冷感特性が大きく、熱容量が大きい特性を持っていることが考察された。実際にPCM寝具に人体が接触した場合、触れた瞬間から2~3分の間で人体から熱を奪うことが予想される。また、結果よりPCM寝具はノーマル寝具に比べ接触した瞬間の熱移動特性が高いため、冷やっと思感があり、熱容量が大きいため人体に触れ続けた場合温かいと感ずる可能性がある。

4.2 実験② 終夜睡眠実験

暑熱、寒冷環境における睡眠深度の推移の比較(全データ平均)を図8, 9に、各時間帯における睡眠効率の比較を図10, 11に(全データ平均)、胸部の皮膚表面温湿度の推移の比較(全データ平均)を図12, 13に、POMSにおける素得点差の比較を図14, 15に示す。Actigraphによって算出された両環境における各試料の睡眠率の比較を図16に示す。有意差検定には2つの標本の平均値の差を検定するt検定を用いた。

4.2.1 PSG

図8, 9で示すように、ノーマルと比べ、PCMで入眠が早く、点線までの時間における睡眠深度の平均を求めた結果、両環境において1%水準で有意差が確認された。(暑熱環境: ノーマル平均値2.03, PCM平均値2.39, $p=3.73E-25$) (寒冷環境: ノーマル平均値2, PCM平均値2.22, $p=1.08E-15$) 図10, 11に示すように、睡眠効率に関しては両環境とも有意差はみられなかったが、ノーマルに比べPCMでばらつきが小さい傾向がみられた。暑熱環境におけるノーマルの標準偏差は平均して10.8であったのに対して、PCMは5.71であった。寒冷環境におけるノーマルの標準偏差は平均して4.67であったのに対して、PCMは4.36であった。

4.2.2 皮膚表面温湿度, 衣服内気候, 寝床内温度

図12, 13で示すように両環境において、PCM寝具での睡眠時の皮膚表面湿度はノーマル寝具での睡眠時の皮膚表面湿度に比べ下回って推移した。(暑熱環境0:00-8:00: ノーマル平均値92.71, PCM平均値91.12, $p=4.05E-14$, 寒冷環境0:00-1:30: ノーマル平均値55.72, PCM平均値53.94, $p=3.24E-14$)

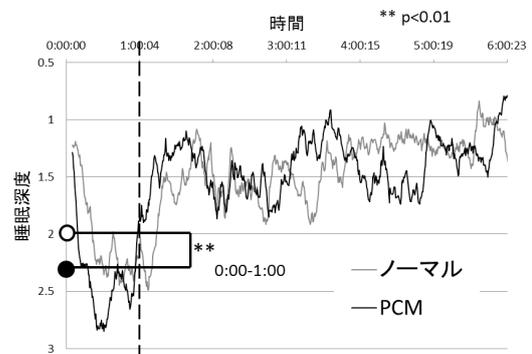


図8 睡眠深度の時間推移の比較 (暑熱環境, N=5)

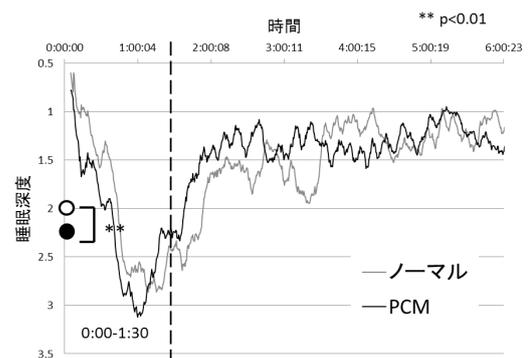


図9 睡眠深度の時間推移の比較 (寒冷環境, N=5)

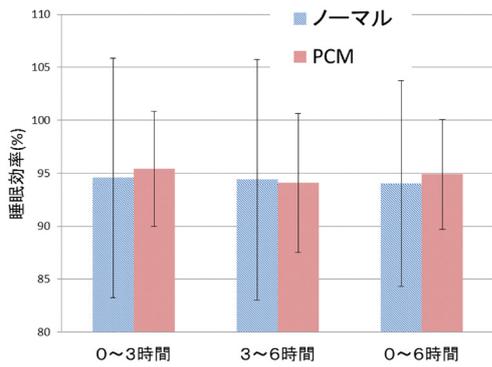


図10 各時間帯における睡眠効率の比較 (暑熱環境, N=5)

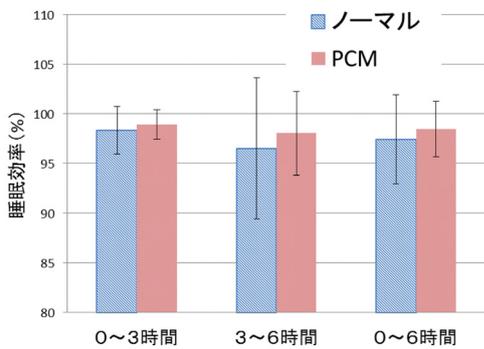


図11 各時間帯における睡眠効率の比較 (寒冷環境, N=5)

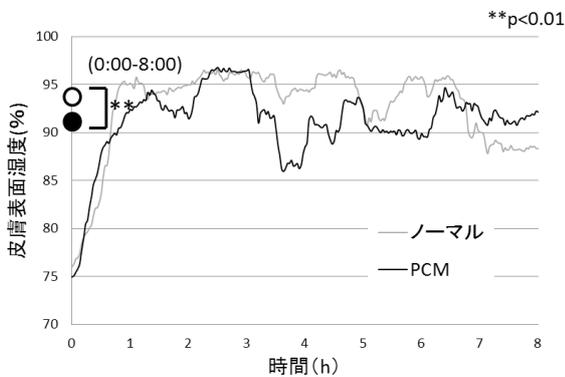


図12 胸部の皮膚表面湿度の時間推移 (暑熱環境, N=5)

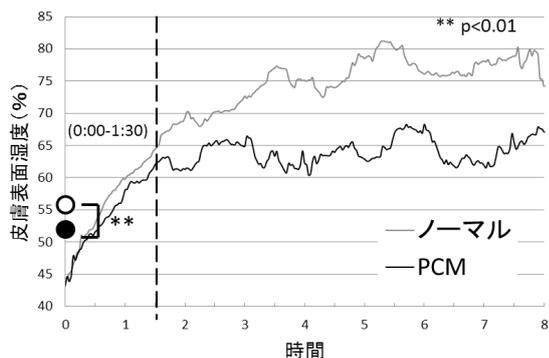


図13 胸部の皮膚表面湿度の時間推移 (寒冷環境, N=5)

睡眠中の温環境では、入眠とともに発汗が増加し、通常睡眠深度が深いほど発汗量が多い。発汗は睡眠周期に応じて増減を繰り返し、入眠時の発汗量が最も多く、レム期に発汗は抑制されると言われている [10]。本実験においても複数のデータで、睡眠深度と胸部の皮膚表面湿度に負の相関関係がみられた。図14にその一例を示す。睡眠時の皮膚表面湿度は発汗の影響を受けやすく、睡眠の質に影響する指標の一つと言える。

図15, 16に暑熱、寒冷環境における衣服内温度の時間推移を示す。両環境とも0:00~1:00の寝付きの部分でPCMが平均値で上回り、危険率1%水準で有意差がみられた。(暑熱環境0:00-1:00: ノーマル平均値35.65, PCM平均値35.57, $p=1.72E-3$) (寒冷環境0:00-1:00: ノーマル平均値33.97, PCM平均値34.56, $p=3.21E-5$)

寝床内温度の結果、暑熱環境ではノーマル35.21の平均値であったのに対してPCMは35.42であった。この差に有意差は確認されなかった。一方で寒冷環境におけるノーマルの平均値は34.84でPCMの平均値は35.14でこの差に危険率5% ($P=0.04$) で有意差が確認された。両環境ともN数は5である。

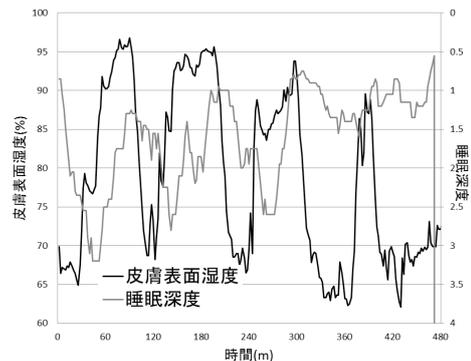


図14 睡眠深度と発汗の関係 (N=1)

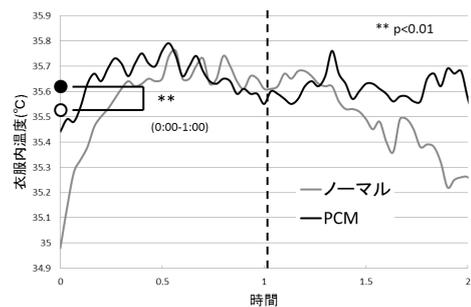


図15 衣服内温度の時間推移 (暑熱環境, N=5)

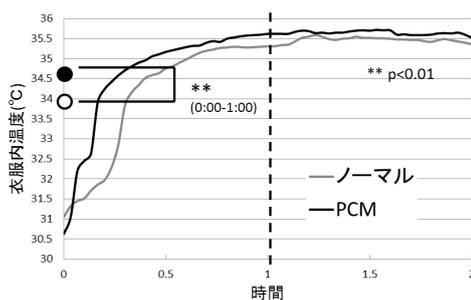


図16 衣服内温度の時間推移 (寒冷環境, N=5)

相変化材料を用いた温熱調節寝具における寝心地評価

4.2.3 POMS

図17で示すように暑熱環境におけるPOMSの結果では、PCMはノーマルと比べ全体的に気分が改善傾向にあった一方で、図18で示すように寒冷環境は全体的にPCM寝具で睡眠後に気分が悪化した。

4.2.4 Actigraph

図19で示すように暑熱環境、寒冷環境共にActigraphにおける睡眠率はノーマルに比べPCMで低い傾向となった。しかし試料間に有意差はみられなかった。

Actigraphの結果より、ノーマルに比べPCMで睡眠率が低い傾向にあったことから、睡眠時の体動量はPCMのほうが多かったことが考えられる。

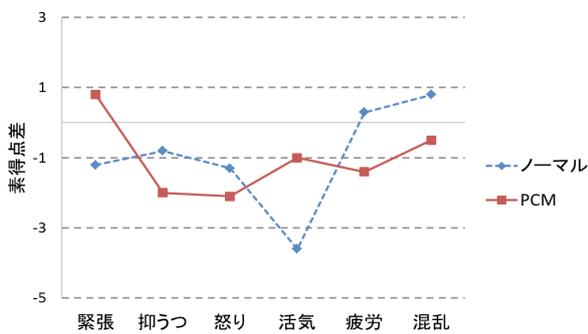


図17 POMSにおける素得点差の比較(暑熱環境, N=5)

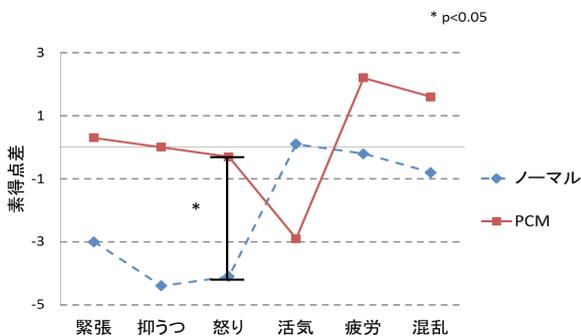


図18 POMSにおける素得点差の比較(寒冷環境, N=5)
[怒り] 平均値: ノーマル-4.1 PCM -0.3, p=0.01

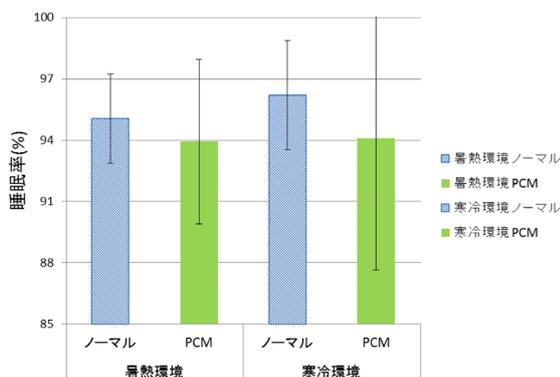


図19 両環境における各試料の睡眠率の比較 (N=5)

5. 考察

実験①でみられたPCMの接触冷感特性が入眠を早くした要因として考えられる。一般的に深部体温の低下が入眠の条件であることが知られている。眠くなった乳児の手が暖くなるように深部体温の低下は末梢部位からの放熱によって促進される。つまり、「末梢血管への血流量増加に伴う熱移動→皮膚温の上昇→熱放散量の増加→深部体温の低下」という一連のプロセスが生じると考えられている [11]。またサーカディアンリズムと入眠の関係を検討したCampbellらによると、深部体温の低下速度が最大となる時、睡眠に導入されやすいと言われており、深部体温の低下速度も入眠と密接に関わっていると考えられている [12]。図15, 16に示すように寝付きの際の衣服内温度がノーマルに比べてPCMが高かったことから、PCMの持つ接触冷感特性が身体の皮膚表面からの熱放散を促進させることによって副交感神経を亢進させ、寝付きを早くしたと考えられる。

暑熱環境において、実験①でみられたPCM寝具の接触冷感特性が人体へ効果的に働いたことが気分の改善につながる要因と考えられる。また、岡本ら [13, 14] の研究によると高温多湿条件 (32℃ 80%RH) での睡眠時に冷却枕を使用した場合、冷却枕を使用しなかった場合と比較して睡眠中の発汗量を抑制し睡眠効率を改善する効果が得られたとある。このことから、枕パッドに使用したPCMの接触冷感特性が睡眠時の頭部を冷却し発汗を抑制した可能性がある。

寒冷環境において、PCMはノーマルと比べ気分が改善していなかった。PCMが皮膚から身体を熱を吸収したことにより発汗は抑制され、被験者は寒さを感じ結果として、睡眠後の気分を悪化させることにつながったと考えられる。

睡眠時、人体から熱が吸熱されている場合、発汗の亢進は考えにくい。そのため、PCM寝具での睡眠時に人体の発汗は抑制されたと考えられる。

暑熱環境における睡眠時の体動量と衣服内温度の両試料の比較を図20に、寒冷環境における睡眠時の体動量と衣服内温度の両試料の比較を図21に示す。Actigraphは睡眠時の体動量をもとに睡眠率を判定している。つまり体動が少ないほど睡眠率は高く判定される。そのためActigraphによって算出された睡眠率より、睡眠率の高い方から4データを体動が少ないグループ(以後、体動少とする)、睡眠率の低い方から4データを体動が多いグループ(以後、体動多とする)として解析を行った。有意差検定には2つの標本の平均値の差を検定するt検定を用いた。その結果、暑熱環境におけるノーマルでは、体動多(平均値: 35.32)の方が体動少(平均値: 35.17)と比較し衣服内温度が高いという結果に対して、PCMでは体動少(平均値: 35.58)の方が体動多(平均値: 35.12)を上回った。それぞれの結果において危険率1%水準で有意差が確認された(ノーマル: p=1.99E-14, PCM: p=2.23E-79)。寒冷環境は暑熱環境同様ノーマルでは体動多(平均値: 35.34)は体動少(平均値: 35.1)を上回る結果となった。この差に危険率1%水準で有意差が確認された(ノーマル: p=5.7E-9)。

PCMでは体動多と体動少の衣服内温度に有意差は確認されなかった。一般的に睡眠時の体動が多ければ、その分熱が発生し衣服内温度も高くなる。ノーマル寝具では暑熱、寒冷環境共に体動が多い場合で衣服内温度の平均値は高くなっている。しかし暑熱環境でのPCMでは体動が多い場合、体動が少ない場合に比べ衣服内温度が低い結果となった。PCMでの睡眠において睡眠時に体動が多かった場合、身体とPCM寝具が触れたり離れたりを頻繁に繰り返すことが考えられる。

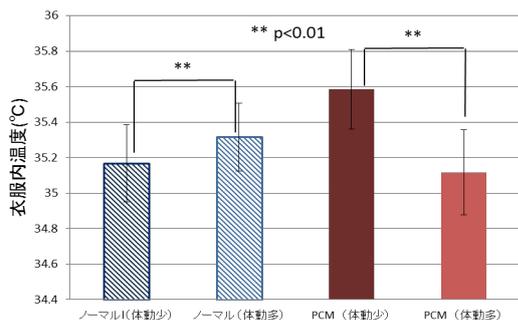


図20 暑熱環境における睡眠時の体動量と衣服内温度の比較 (N=4)

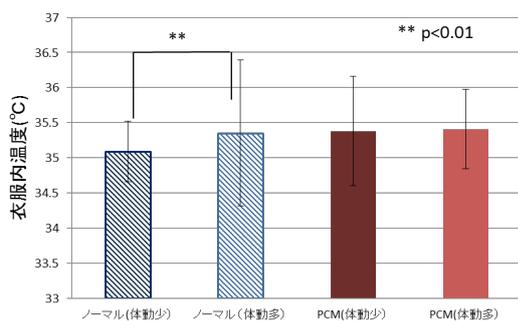


図21 寒冷環境における睡眠時の体動量と衣服内温度の比較 (N=4)

6. まとめ

実験①の結果よりPCM寝具には接触冷感特性があり、人体に触れた瞬間のヒヤッと感が強いことがわかった。

実験②のPSGではPCMでの睡眠時に寝付きが早い傾向がみられた。寝付きにおける衣服内温度でPCMは平均してノーマルを上回った。このことからPCMの持つ接触冷感特性が身体の熱を吸収することにより、末梢部位からの熱放散を促進し副交感神経を亢進させ、寝付きを早くしたと考えられる。またPOMSの結果、暑熱環境はPCMでおおむね気分の改善がみられたのに対して、図16に示すように、寒冷環境では全項目においてノーマルに比べPCMで気分は改善しないという結果であった。実験②の結果より、暑熱、寒冷環境共に皮膚表面湿度でPCMがノーマルを下回って推移していた。皮膚近傍における湿度を左右する要因としては人体の発汗が考えられる。そのためPCMでの睡眠時に発汗量が全

体的に少なかったことが予想される。暑熱環境ではPCMが人体を冷却する働きをした場合、皮膚表面湿度の上昇を抑制し、被験者の不快感を和らげる可能性がある。しかし寒冷環境の場合、人体の熱を吸収し皮膚表面湿度の上昇を抑制したことは、睡眠中のエネルギー消費を増加させ、寝心地を悪くしたのではないかと考えられる。

本結果から異なる温熱特性を持った寝具で睡眠を行った際の寝心地の良さを、心理・生理反応の計測から求められる睡眠の質の分析から評価できる可能性を得た。

参考文献

- [1] 厚生労働省：保健福祉動向調査，2000.
- [2] 梁瀬度子：寝具，睡眠の科学，朝倉書店，pp.117-126，1984.
- [3] 野田明子，古池保雄：終夜睡眠ポリグラフィ，解説特集：睡眠の生体計測技術生体医工学，46(2)，pp.134-143，2008.
- [4] Rechtschaffen A., Kales A.: A Manual of Standardized Terminology, Techniques and Scoring System for Sleep Stages of Human Subjects, US Department of Health, Education, and Welfare Public Health Service NIH/NIND, 1968.
- [5] 赤林朗，横山和仁，荒記俊一：POMS (感情プロフィール検査) 日本語版の臨床応用の検討，日公衛誌，31，pp.577-582，1991.
- [6] 横山和仁，荒記俊一，赤林朗：POMS (感情プロフィール検査) 日本語版による抑うつ患者の評価，日公衛誌，39，p.901，1992.
- [7] 中山栄純，小林宏光，山本昇：アクチグラフによる睡眠・覚醒判定の基礎的検討，石川看護雑誌，3(2)，2006.
- [8] Cole RJ, Kripke DF, Gruen W: Automatic sleep/wake identification from wrist Activity. Sleep, 15(5),461-469, 1992.
- [9] 大中忠勝，高崎裕治，栃原裕，永井由美子，伊藤宏充，吉竹史郎：冬期における浴室温熱環境の全国調査，人間と生活環境，14(1)，pp.11-16，2007.
- [10] 入来正躬：体温生理学テキスト，文光堂，p.229，2003.
- [11] 小田史郎：睡眠前の体温変動が入眠に及ぼす影響，北海道浅井学園大学生涯学習研究所研究紀要，4，pp.223-231，2003.
- [12] Campbell SS, Murphy PJ.: Relationship between sleep and body temperature in middle-aged and older subjects, J Am Geriatr Soc., 46, pp.458-462, 1998.
- [13] Okamoto-Mizuno K, Tsuzuki K, Mizuno K: Effects of head cooling on human sleep stage and body temperature, Int. J. Biometeorol., 48, pp.98-102, 2003.
- [14] 都築和代，本多和樹(監修)：眠りの科学とその応用，第15章 快適な睡眠をサポートする温熱環境，p.196，2007.

相変化材料を用いた温熱調節寝具における寝心地評価



橋本 一馬 (学生会員)

2013年3月 信州大学繊維学部卒. 2015年3月 信州大学大学院理工学系研究科修了. 同年4月より, 住江織物株式会社に入社. 信州大学大学院理工学系研究科在学中には, 感性計測および寝心地評価に関する研究に従事.



青井 政貴 (学生会員)

2012年3月 信州大学大学院工学系研究科修了. 2015年3月 信州大学大学院総合工学系研究科修了. 博士(工学). 同年4月より, 東京都庁に入庁. 信州大学大学院総合工学系研究科在学中には, 感性計測および寝心地評価に関する研究に従事.

る研究に従事.



吉田 宏昭 (正会員)

信州大学繊維学部感性工学課程准教授. 博士(工学). 京都大学再生医科学研究所研究機関研究員(講師), Johns Hopkins University ポスドク, 産業技術総合研究所デジタルヒューマン研究センター研究員, 信州大学繊維学部感性工学科助教などを経て, 2010年から現職. 「歩く」, 「座る」, 「寝る」といった人間の日常的な基本動作の感性計測や心地評価に関する研究に従事している.



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.