

短時間入眠誘導プログラムへの挑戦

A challenge to artificial control of sleep onset

市村孝雄¹⁾、西開地由美²⁾、長沼朋子²⁾

Takao Ichimura¹⁾, Yumi Nishikaichi²⁾, and Tomoko Naganuma²⁾

抄録

近赤外領域の熱線によって下肢を照射し短時間入眠を実現する条件を検討するため、睡眠障害のない被験者を募り、近赤外線照射・非照射条件で入眠潜時を測定した。照射線源には波長1.3ミクロンに輻射ピークをもつ100W赤外線ランプ2本を用い、被験者の足底15cmの距離から15分間照射した。照射開始と同時に閉眼した場合、照射終了後に閉眼した場合、どちらの場合も平均約3分という短時間で入眠した。照射のない場合は平均約5分であったが分散が大きく、入眠時間は一定しなかった。その間、舌下温を連続記録して中枢温を推定すると、15分間の照射後に0.2℃低下し、その後0.1℃の範囲で上下変動しつつ、ほぼ36.8℃で定常状態に向かった。この短時間で入眠した結果は、中枢温が下がる前に眠ったことを示すものであり、末梢への熱負荷によって上昇した中枢温が熱放散によって低下する際に覚醒水準が下がって入眠が誘導されると考えると、説明が難しい。むしろ、近赤外線照射を受けた足底皮膚の温度が、発汗による熱放散を起こさない熱的中性域に近い適正温度域に保たれたため、照射による皮膚温熱知覚神経刺激が痛みを伴わない快刺激となって入眠を促進したと考えられるかもしれない。

キーワード

睡眠、近赤外線、体温、脳波、アルファ波

Abstract

Physiological effects of near-infrared irradiation on the sleep onset were examined in 26 young subjects. They were exposed to near-infrared light (NIR) on their foot before or during the sleep onset. Sublingual temperature as a measure of the subject's core temperature was measured every one minute. Electroencephalogram (EEG) was recorded from FZ-, CZ- and PZ-position, and the recording was analyzed manually. The sleep latency was determined according to the conventional rule of latent time in which percent-time-alpha is reduced to 50% or less. About 15min after the onset of NIR exposure, the sublingual temperature was slowly lowered by 0.2℃, then returned to the initial level within c.a. 35min. The average percent-time-alpha of EEG was reduced to 50% or less within the first 3-4 minutes. This simple result shows that the mild NIR exposure worked to shorten the sleep latency for subjects to reach the stage-1 sleep within a few minutes. Some afferent neural projections from subcutaneous sensory neurons rather than the slower change in brain temperature might be responsible for this rapid sleep.

Key Words

sleep, far-infrared ray, body temperature, EEG, alpha wave

序論

我々は一生涯の3分の1を眠りに費やす。生体内時計による規則正しい睡眠と覚醒の日周リズムで、夜集中して眠り朝目覚めて活動する。このリズムが乱されると、昼間の覚醒が維持できなくなり、問題が起こる。睡眠中も脳は活動を停止せず、記憶の整理、ホルモン

分泌、免疫力回復など、積極的に機能しているので、睡眠は機能回復に重要だ。

しかし、現代は不眠社会といわれるほど睡眠障害が社会の関心事となっている。日本人の5人に1人が睡眠の悩みを抱えている。夜型生活、交代勤務、社会ストレス、高齢化などによる不眠が増加している。居眠

¹⁾ 山口県立大学大学院健康福祉学研究科 Graduate School of Health and Welfare, Yamaguchi Prefectural University

²⁾ 山口県立大学看護栄養学部 School of Nursing and Nutrition, Yamaguchi Prefectural University

りによる産業事故、交通事故による社会的損失は大きい。睡眠障害の早期診断、治療法の開発が求められている。

このような状況の中で2002年、学会議が「睡眠学の創設と研究推進の提言」を公にし、2004年には「睡眠学」が文科省科学研究費細目に加えられた。筆者は「睡眠覚醒を自己管理するテイラーメイド快眠プログラムの開発」を企画し、2009年度科学研究費補助金を申請して助成を受け、4月より本研究を開始した。

これに先立ち2007年から2009年にかけて筆者は、(株)中井産業が開発した遠赤外線加温寝台の入眠促進効果を検証し、入眠潜時の短縮を示す生理学的データを得た。就寝時の適度な遠赤外線照射が入眠を早めるという貴重なデータであった(投稿中)。本稿は、その試みを一歩進めて、より迅速で効率的な身体末梢加温作用が期待される近赤外線末梢を照射し、更に短時間の入眠促進効果を検証しようとする科学研究費補助金平成21年度研究計画の結果(一部)を報告するものである。

方法

実験と測定は、睡眠の物理的環境要因(時刻、寝台、寝具(布団、枕、着衣)、温度、湿度、明暗、騒音、臭気など)を制御可能な範囲で一定範囲に設定し、睡眠の生理的環境要因(睡眠習慣、体温、食事、空腹感、ストレスなど)を可能な限り安定な範囲に維持して実施した。期間と時刻は7月~11月の午後1時~6時、被験者は軽量の薄手布団上下の間に着衣のまま臥床、測定環境は室温23℃~27℃、湿度55%~65%、暗幕で遮光遮音、脱臭剤で除臭した。

実験と測定に先立って、被験者には24時間前から激しい運動、アルコール、薬剤を禁止し、直前にPittsburg Sleepiness Testの日本語訳(筆者による)を使って主観的睡眠障害のない学生26名を選んだ。

被験者の足底に臥床位で近赤外線(輻射強度ピーク波長1.3ミクロン)を照射(100Wx2, 600Lux, 15min)し、前後60-90minの脳波、心電図、皮膚温、舌下温を連続記録し、終了後に解析した。

脳波の記録チャートから睡眠段階を判読し、心電図心拍変動解析から高周波成分割合を計算し、舌下温記録から深部体温の上昇下降を読み取った。

舌下温は、皿型熱電対をマウスピースに装着して、温度センサーが舌下に保持されるよう固定した。マウスピースの熱容量が大きいため装着後に口腔内温度が安定するまでに約10分を要すること、今回の近赤外線

照射条件で舌下温の変動が認められるのは照射開始5分より後となることを事前の測定によって確認した。

被験者の安全のため、照射部位の皮膚温が安全限界43℃を超えないことを連続記録デジタル温度計によって監視した。

なお、この研究計画は、山口県立大学生命倫理委員会の審査と承認を受けて実施した。

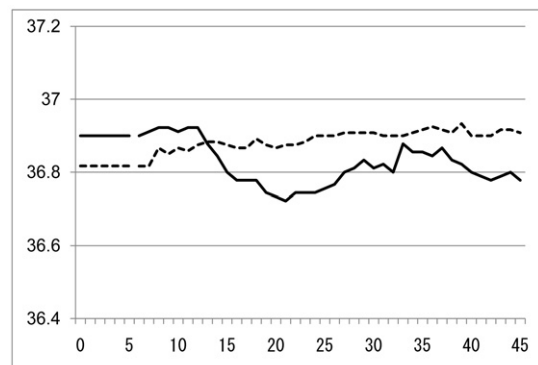
結果

(1) 舌下温

入床した被験者の舌下温を3様の状態で測定し、連続記録を行って次の結果を得た。

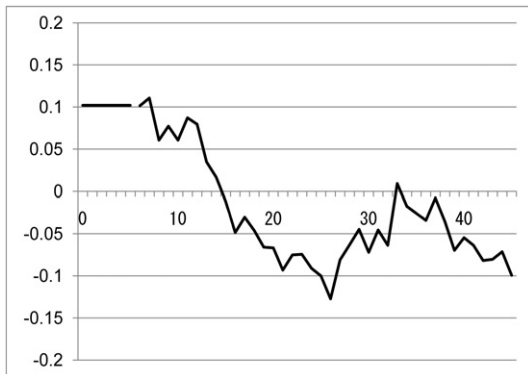
a 閉眼と同時に近赤外線照射を開始し15分後に照射を終了した場合(図1実線)、舌下温は最初の12分間36.9℃に留まり、その後徐々に低下を始めて20分後に36.7℃に下がり、40分後には36.8℃に復帰して、以後ほぼ定常状態となった。

b 近赤外線照射を15分間続け、照射終了後に閉眼させた場合(図1破線)、舌下温は閉眼7分後から0.05℃~0.1℃上昇して、27分後には36.9℃に達し、以後ほぼ定常状態を維持した。照射終了と同時に閉眼を開始して7分後から27分後までの上昇期間は、aの場合の照射終了後20分から約20分間の上昇期間と位相が一致する。



(図1) 近赤外線照射時の舌下温時間変動

近赤外線照射の開始と同時に閉眼した場合(IR ON、実線)、近赤外線照射終了後に閉眼した場合(IR OFF、破線)について、閉眼から45分間の舌下温を示す。横軸は閉眼後の時間(分)、縦軸は℃を示す。初期5分間は補正值で置き換えてある。IR ONの場合、閉眼12分後の照射終了前から36.9℃より下がり始め、21分後(照射終了6分後)に36.7℃に達した後、36.8℃前後に復帰して41分後(照射終了20分後)あたりから定常状態に落ち着いた。IR OFFの場合、照射終了6分後から26分ごろまで続く20分間の上昇期間は、IR ONの場合の低下後20分間の上昇期間と同位相となっている。



(図2) 近赤外線照射条件と閉眼後の舌下温時間変動の関係
近赤外線照射の開始と同時に閉眼した場合(IR ON、実線)、と近赤外線照射終了後に閉眼した場合(IR OFF、破線)の舌下温の差を示す。温度差に注目すると、照射開始と同時に閉眼した場合、0.1℃高い状態から下がり続け、照射終了26分後までに0.2℃下がって、以後約15～20分で定常状態に向かった。

c. 近赤外線非照射の場合、舌下温は入眠前後の15分間は、あきらかな変化を示さなかった。

a.とb.の場合について、舌下温の時間経過は図1に示すとおりであった。

a.とb.の場合の温度変動を差し引きして比較すると、図2のとおりとなった。

a.の場合、閉眼した時点でb.の場合より約0.1℃高い状態から始まり、照射の間さがり続けて照射終了後0.1℃低い状態に達して後わずかに上昇して、以後ほぼ定常状態に落ち着いた。

(2) 脳波アルファ波割合

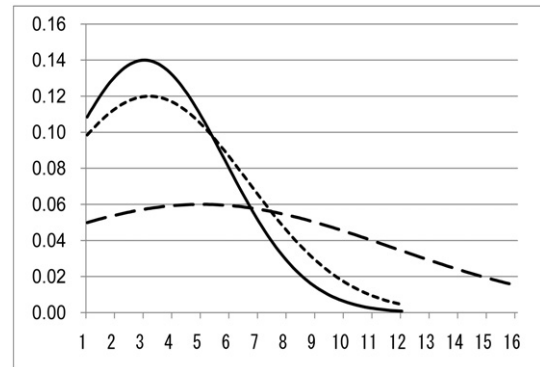
脳波の記録チャートから1分毎のアルファ波割合(%*a*)が50%以下となり、引き続き睡眠第1又は第2ステージの特徴波が出現した場合に、閉眼後50%を割るまでの所要時間をもって「入眠時間(潜時)」と判定し、次の結果を得た。

a 閉眼と同時に近赤外線照射を開始した場合、平均入眠時間は3分(標準偏差2.8分)であった。

b 開眼して近赤外線照射を開始(15分継続)し照射終了後から閉眼した場合、平均入眠時間は3.2分(標準偏差3.5分)であった。

c 近赤外線非照射の場合、平均入眠時間は5分(標準偏差6.6分)であった。

この結果を、平均値と標準偏差値をそれぞれに一致させた正規分布曲線で近似すると、図3のとおりとなった。



(図3) 近赤外線照射の開始と同時に閉眼した場合(実線)、近赤外線照射終了後に閉眼した場合(破線)、近赤外線照射のない場合(鎖線)について、それぞれ睡眠ステージ1に達する所要時間(入眠潜時)の分布を示す。各被験者集団の統計平均と分散を用いてそれぞれ正規化した正規分布曲線で近似した。近赤外線照射のある場合は、どちらもおよそ3分で入眠している。照射のない場合は、平均5分で眠っているが、分布は広い。

一方、心拍変動解析の結果は、高周波成分割合の時間変動に一貫した傾向が認められず、近赤外線照射条件と入眠時間との相関関係を認めることはなかった。心臓迷走神経(副交感神経)の活動は、今回の近赤外線照射条件では、上昇あるいは下降する傾向を伺わせる変動はみられなかった。

考察

舌下温の時間経過は、閉眼と同時に照射を開始すると、12分後から下がり始めて21分後に0.2度低下し、その後20分で0.1℃回復した。開眼して15分間照射の後に閉眼すると、7分後から上昇して27分後からは0.1℃高い状態ではほぼ定常状態を保った。

入眠潜時は、閉眼する前または後の15分間の近赤外線照射によって平均約3分の短時間という結果であった。近赤外線を照射しない非照射条件での入眠時間は約5分であった。すなわち、近赤外線照射がある場合、照射と閉眼のタイミングによらず閉眼3分後に眠り、近赤外線照射がない場合でも平均5分で眠った。

線源から15cmの位置で約600LUXの照度をもつ近赤外線ランプによって照射された足底は表面温度33～41℃に達していた。このレベルの温熱刺激がもたらす局所作用として、皮膚知覚神経を介する脊髓反射と皮下血管の反射的な平滑筋弛緩、その結果として起こる局所血管の拡張と血流の増加が考えられる(八塚他, 2004; Inoue et al., 2009; 福井, 1983; 細川他, 2001; 佐伯他, 2001; Michelle, 2006; Okamoto-Mizuno et al.,

2008)。さらに、舌下温の変動から中枢温すなわち脳温が0.2℃の幅で上昇下降して反射的応答を示すことが読みとれた。また、この照射強度では、皮膚温熱知覚器は痛覚を覚えることはなかった。このことから、被験者は15分間の近赤外線照射を不快な刺激としてではなく、熱感を伴う快刺激と知覚していると考えられる。同様に、温水部分浴あるいは保温性の良い寝具など温和な加温保温による睡眠の質向上効果を示す先行研究は少なくない (Youngstedt, 2005; 新村ら, 2004; 橋本ら, 2008; 市村, 2006; 吉永, 2005; 萬代ら, 2001; 都築, 2007; Okada et al. 1994; 藤原ら, 2004; 岩瀬ら, 2004)。

一方、3分～5分という入眠時間は、標準的睡眠環境での平均的入眠時間とされる15分に比べて短時間となっている。このことは、今回の睡眠環境には入眠を促す他の要因が近赤外線の他にも作用している可能性を示唆するかもしれない。午後1時～6時の測定時間帯は1日2回周期的に襲ってくる睡眠圧の高い時間帯を含むため、温度調節された静謐な暗室という測定環境が生む「実験室効果」が短時間入眠誘発条件として作用した可能性を否定できないかもしれない。

小林らは、入浴によって上昇させた深部体温 (すなわち脳温) が全身の熱放散によって低下する際に脳の全般的代謝が低下し覚醒水準が下がって睡眠が誘導されるとする考えを提起している (小林, 2009)。我々の近赤外線局所照射では、皮膚組織の熱刺激応答と脊髄反射を介した末梢血管の拡張と熱放散が深部体温を下げる作用をもたらしたと考えることは可能であるが、局所照射によって身体に負荷される熱量は入浴に比べて制約され、末梢血管の拡張と熱放散は局所に限局され、直後の中枢温上昇はみられなかった。したがって、照射開始3分後に入眠した事実を、全身の熱放散と脳温低下のみによって理解することは難しい。むしろ、末梢の局所温熱刺激によって、皮膚温度知覚器を含む皮膚知覚神経から中枢への上行性投射が、視床から大脳皮質に広く投射する覚醒系の働きを抑制するか、あるいは視索前野にあるとされる睡眠中枢の働きを促進する可能性を想定することができるかも知れない (北浜, 2009)。

今回の結果は、特に睡眠障害のない健康な学生を被験者に選び、睡眠圧の高い午後の時間帯と静謐な暗室という人工的な睡眠環境で、不快刺激とまらない熱量の近赤外線足底を温めるという人為的介入を行って得られたものである。測定の時間帯は被験者に対する倫理的配慮から選び、遮光遮音電磁遮蔽という実験室環境は測定の物理的要請から選び、それぞれ代替策の

得難い状況で選択したものであった。しかしながら、日常的な睡眠もまた、深夜から午前にかけてやはり睡眠圧の高い時間帯に入床し、暗く静かで安全な閉鎖空間である寝室で眠る。従って、これら睡眠環境条件の相違が日常的な平均入眠時間と今回の実験的平均入眠時間との差を説明するとは考えにくい。

筆者は、足底の温熱受容器に対して痛覚刺激とならない適度な強度と温度で、局所組織の過剰反射を誘発しない短時間の適度温熱刺激が被験者にとって快適刺激となり、速やかな入眠を引き起こしたと考える。入来によれば、皮膚温熱受容器への熱刺激が痛みと知覚されるのは10～15℃以下あるいは43℃以上であり、代謝による熱産生と発汗による熱放散が最小となって温度が意識されず快適と感じられる熱的中性域は30～36℃とされる (入来, 2003)。今回の設定では、実測した足底表面温は度33℃～41℃となり、36℃以下では適正温度域にあったが、36℃を超えた時には痛み刺激を伴わない熱感が意識される状況であった。何らかの方法で入眠を検知した時点で照射を止めることができれば以後の睡眠を妨げないと考えられる。

今回の環境設定は、被験者が平均3分で入眠した事実から、少なくとも健康な若年者の短時間入眠を促す環境条件を部分的には満たすものといえる。深部体温をモニターして末梢を温め、入眠を検知してそれを止める自動監視システムを働かせることができれば、短時間入眠の自己管理も夢ではないのかもしれない。

謝辞 この研究は文部科学省科学研究費補助金 (平成21～22年度挑戦的萌芽研究、研究課題番号21650175) の助成を受けて実施した。

参考文献

- 1) 八塚美樹, 和田重人, 田澤賢次, 安田智美, 吉井美穂, 田澤賢一, 古田勲: 遠赤外線による温熱療法が生体へ与える影響, 日本ハイパーサーミア学会誌, 4, 257-265, 2004
- 2) Inoue S., Takemoto M., Ide T., Nishizaka M., Chishaki A, Sunagawa K.: Leg heating using far-infrared radiation in patients with chronic heart failure acutely improves hemodynamics, vascular endothelial function and oxidative stress. *Circulation Journal*, 73 (Suppl.1), 347, 2009
- 3) 福井罔彦: 痛みの生理学10, 痛みに対する物理療法の機序 (1), 理・作・療法7, 387-404, 1983

- 4) 細川豊史, 前川恭代: 直線偏光近赤外線に関する基礎研究ダイジェスト (3) 微小循環に及ぼす作用, 低反応レベルレーザーと直線偏光近赤外線, 小川節郎編, 真興交易 (株) 医書出版部, 23-29, 2001
- 5) 佐伯隆広, 薄井荘一郎, 高田重男: 直線偏光近赤外線に関する基礎研究ダイジェスト (2) 循環器系への作用, 低反応レベルレーザーと直線偏光近赤外線, 小川節郎編, 真興交易 (株) 医書出版部, 81-87, 2001
- 6) Michelle H. Cameron (渡部一朗訳): EBM物理療法, 医歯薬出版, 166-195, 2006
- 7) Okamoto-Mizuno K., Yamashiro Y., Tanaka H., Komada Y., Mizuno K., Tamaki M., Kitado M., Inoue Y., Shirakawa S.: Heart rate variability and body temperature during the sleep onset period. *Sleep and Biological Rhythms* 6 (1), 42-49, 2008
- 8) Youngstedt, S.D.: Effects of exercise on sleep. *Clin. Sports Med.*, 24, 355, 2005
- 9) Kobayashi T., Tomita S., Arakawa K., Hot P.: Effects of a hot bath on the sleep onset process. *Proc. International Congress on Human-Environmental System, IVHES 5 in Tokyo Japan.* 122-125, 2005
- 10) 新村哲夫, 張水, 堀井裕子, 長瀬博文, 荒谷哲雄, 王紅兵, アリ・ナセル・モアデリ, アレックス・ガイナ, 関根道和, 鏡森定信: 海洋深層水温浴のリラックス作用及び睡眠への影響に関する研究 深夜勤務明け後の朝の入浴についての検討, *日本温泉気候物理医学会雑誌*, 67 (3), 155-164, 2004
- 11) 橋本知子, 松本明美, 高橋マツ子, 川島美佐子, 富沢美幸, 武村敏弘, 宮本郁子, 小林敏孝: 足浴が睡眠に与える効果, *足利短期大学研究紀要*, 28 (1), 97-100, 2008
- 12) 市村孝雄: 足浴の生理的作用について 31例のケーススタディ, *山口県立大学大学院論集*, 7, 75-80, 2006
- 13) 吉永亜子: 睡眠を促す援助としての足浴についての文献検討, *日本看護技術学会誌*, 4 (2), 4-13, 2005
- 14) 萬代幸, 犬山義明, 荒川一成: 敷寝具の使用感に関する心理評価 寝具の温度特性が睡眠に与える影響について, *第19回睡眠環境シンポジウム研究論文集* 19, 16-22, 2001
- 15) 都築和代: 快適な睡眠をサポートする温熱環境, 眠りの科学とその応用, 本多和樹監修, シーエムシー出版, 2007
- 16) Okada M., Midorikawa-Tsurutani T., Tokura H.: The effects of two different kinds of quilt on human core temperature during night sleep. *Ergonomics*, 37 (5), 851-857, 1994
- 17) 藤原義久, 岡田志麻, 鈴木伸吾, 黒田征平, 松浦英文, 安田昌司, 飯田健夫, 牧川方昭: 寝床内温度フィードバック機能付きエアークンترلーフとんの開発, *生体医工学*, 42 (4), 362-370, 2004
- 18) 岩瀬敏, 高田宗樹, 橋口真澄, 渡邊順子: セラミック蒸着毛布が高齢者の体温調節に及ぼす影響, *自律神経*, 41 (2), 195-199, 2004
- 19) 小林敏孝: 頭部冷却と局所温熱制御による睡眠改善効果, *睡眠学*, 朝倉書店, 429-430, 2009
- 20) 北浜邦夫: 脳と睡眠, 155-158, 朝倉書店, 2009
- 21) 入来正躬: 体温生理学, 文光堂, 60-67, 2003

