

## 睡眠前の体温変動が入眠に及ぼす影響

### The Effects of Pre-Bedtime Changes in Body Temperature on Sleep Onset

小 田 史 郎

ODA, Shiro

#### I. はじめに

睡眠障害は、現代社会に蔓延する大きな社会問題であり、早急な対応が望まれている。近年、生活習慣を見直すことによって睡眠を改善しようとする生活処方に注目が集められており、光照射や入浴、身体運動が睡眠改善に有効であるかどうかの検討がなされている。夜型志向や非活動化といった生活習慣の乱れが睡眠障害に拍車をかけていることから、生活習慣を見直すという考え方は理にかなっていると思われる。これらの生活処方の有効性について論じるとき、キーマカニズムとしてあげられるのが体温である。これまで数多くの報告において、体温と睡眠との密接な関係について明らかにされてきた。そこで本論文では、体温変動と睡眠の関連性について文献検討を行い、体温変動を介した生活処方の有効性について検討を加える。本論文では特に、睡眠障害のなかでも大きな割合を占めている入眠困難を取りあげ、睡眠前の体温変動が入眠に及ぼす効果について話を進める。

#### II. サーカディアンリズムとホメオスタシス機構

深部体温と睡眠はどちらも、ホメオスタシス機構とサーカディアンリズムの影響を受けることが明らかにされている<sup>5)</sup>。ホメオスタシス機構とは、体内の恒常性を維持する機構のことであり、この機能が働くことでヒトはあらゆる環境に適応して生きていくことができる。体温調節機能はホメオスタシス機構の代表的なものである。例えば、ヒトが冷環境におかれた場合、体熱が奪われないようにするためのさまざまな生理反応が認められる。末梢血管が収縮して皮膚表面の血流量が減少するのは、熱が皮膚表面から逃げてしまわないようにするためである。また震え (shivering) も熱産生によって深部体温を維持するための不随意的な筋収縮反応である。

夜間睡眠もまた、脳を中心とした身体全体を適度な状態に保つためのホメオスタシス機構としての役割を持つと考えられる。したがって、夜間睡眠が十分にとれなかった翌日には大脳の機能低下が認められ、睡眠不足が継続したときにはさまざまな身体的症状が認められることになる。このほかに睡眠のホメオスタシス機構を表す現象として、長時間睡眠をとらなかった後に深い睡眠が多量に出現する「はねかえり現象」があげられる。

一方、サーカディアンリズムとは24時間を周期とする生理的リズムのことである。体温のなかでも深部体温には、夕方に最も高く、明け方に最も低くなるという日内リズムが存在する。ヒトの体内には深部体温の日内リズムを形成する振動体に加え、睡眠-覚醒リズムを形成する別の振動体が存在することが明らかにされている<sup>5)</sup>。普段の生活においては、この2つの振動体が同調しているため、覚醒から睡眠への移行、睡眠から覚醒への移行は体温リズムに密接に関わりながら行われる。例えば、睡眠は深部体温が低下し始めてから2~3時間後に開始され、深部体温が上昇に転じてから終了することが報告されている<sup>5)</sup>。この2つのリズムが同調しない場合には、さまざまな身体への悪影響が認められている。長時間の飛行機移動などによって生じる時差ぼけの症状はこれにあたる。これは深部体温が非常に強固に日内リズムを形成しているために、睡眠-覚醒リズムと合わなくなるのが原因と考えられている。

### Ⅲ. 体温と眠気・入眠の関係

十分な睡眠がとれなかった翌日において、大きな眠気に悩まされることはよく経験されることである。眠気は脳における睡眠欲求のサインであり、眠気の大きさが睡眠需要の大きさを反映すると考えられている。

眠気もまたサーカディアンリズムや約半日周期リズムなどの影響を受け、時刻に依存して変化することが報告されている<sup>6)</sup>。一日のなかで最も大きな眠気が出現するのは、夕方以降から夜間にかけてである。これは日内リズムと半日周期のリズムの山がちょうど重なる時間帯にあたる。この眠気の出現と体温変動は非常に良い対応を示しており、一般的には深部体温が低下する時間帯に大きな眠気が生じることが明らかにされている。また深部体温のサーカディアンリズムと入眠の関係を詳しく検討したCampbellら<sup>4,15)</sup>によって興味深い結果が得られた。彼らはさまざまな年代の人を対象に、深部体温の低下速度が最大となる時 (maximum rate of decline : MROD) と入眠の関係を検討し、ほぼ90%の人においてMRODが認められて数時間以内に睡眠が始まることを明らかにした。彼らはまた、MRODが出現する時刻と入眠時刻が近いほど入眠後1時間に深い睡眠が増え中途覚醒時間が減少することを報告し、良好な睡眠を得るための入眠のタイミングとしてMRODが良い指標になると考えている。これらの報告は、入眠が単なる深部体温低下と関係するのではなく、「急激な深部体温低下」と密接に関係することを示唆する。

またKrauchiら<sup>12)</sup>は、深部体温の低下と眠気・入眠の関係が、人工的な介入によって深部体温を低下させた場合にも同様に認められるかどうかの検討を行った。彼らが深部体温低下の手段として用いたのは、メラトニンの経口投与と姿勢の変化(横になること)である。その結果、どちらの介入後にも深部体温は低下し、眠気の増加を伴って、入眠潜時(入眠に要した時間)が有意に短縮した。彼らの研究で興味深いのは、これらの深部体温低下に伴う眠気増加が、体温リズムの上昇位相にあたる時間帯(正午付近)においても認められたことである。以上の結果によって、急激な深部体温低下と入眠の密接な関係が明らかにされ、介入的に深部体

温を変化させることも睡眠改善に有効であることが示唆された。

Krauchiら<sup>10,11)</sup>はまた、入眠に関係ありそうな因子を様々に取りあげ、どの因子が入眠を予測する指標として適切であるかの検討を行った。彼らを取りあげた因子は、以下のとおりである（深部体温、深部体温変化率、体幹皮膚温、末梢皮膚温、体幹と末梢の皮膚温の差（Distal-to-Proximal skin temperature Gradient：DPG）、心拍数、メラトニン潜時、眠気）。その結果、体幹から末梢への熱移動や末梢部位での熱放散量を反映していると考えられるDPGが、入眠を予測する因子として最も適しているとの結果を得た。彼らの報告により、眠気や入眠とよく対応しているのは深部体温の低下ではなく、末梢部位の血管拡張に伴う熱放散量の増加ではないか、との考え方が注目されてきている。

深部体温は熱産生と熱放散のバランスによって保たれているが、深部体温の低下のほとんどが末梢部位からの熱放散によると考えられている。したがって、「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」という一連の体温調節プロセスが生じているとき、眠気や入眠が促進されると考えることができる。

こうした体温変動と入眠を結び付けている生理的なメカニズムとして、視索前野—前視床下部（preoptic/anterior hypothalamus：POAH）に存在する脳温感受性ニューロン系の関与が考えられている<sup>14)</sup>。これらのニューロンは、末梢血管を拡張させ熱放散量を増加させるなど体温調節に働く一方、睡眠を調節する機能を持つといわれる。動物実験の結果であるが、POAHを部分的に加熱することで熱放散の増加という体温調節機能が生じるとともにノンレム睡眠が誘発されることが報告されている<sup>13)</sup>。このように体温と睡眠の密接な関連は、POAHの重複機能から説明することができる。

#### IV. 体温変動を活かした入眠改善

前述したように、入眠困難は睡眠障害のなかでも大きな比重を占める症状であり、効果的な改善法が望まれている。入眠困難を引き起こす原因をあげてみると、加齢に伴う生理機能の低下、カフェインの摂取や夕方遅い時間帯での昼寝による睡眠欲求度の低下、過度の運動や緊張や不安に伴う生理機能の興奮など様々である。また、試験やスポーツの大会などの前日に一時的な緊張や不安などの精神的ストレスが寝つきを阻害することもしばしば経験される。こうした精神的ストレスへの直接の対処は難しいため、生理的に眠気を高める手段が有効と考える。ここでは、身体運動と入浴という2つの生活習慣を取りあげるが、両者とも深部体温を一時的に上昇させる生活行動である。この上昇した深部体温を積極的に下げるために、熱放散量を増加させるなどのホメオスタシス的な体温変動が生じ、これが入眠を促進するのではないかと考えられる。図1に予想される体温変動のモデルを示した。

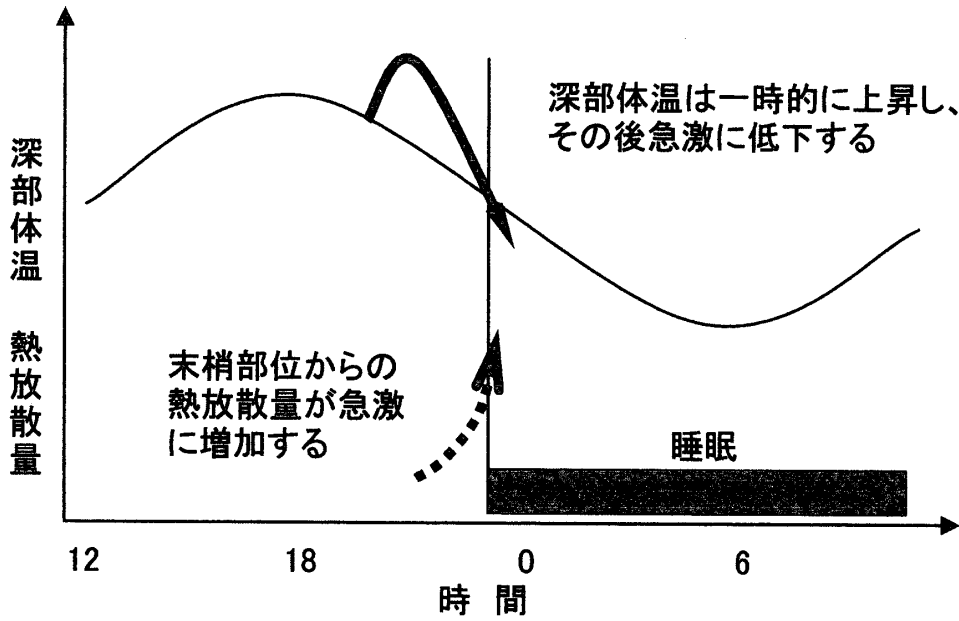


図1 身体運動や入浴によって生じると考えられる体温変動モデル

1. 身体運動

身体運動は深部体温を能動的に上昇させる生活行動である。運動終了後にはこれらの産生された熱を放散するために、末梢部位への血流量が増加する。筆者らが50分間の快適自己ペース走前後の大腿前面における皮膚温変動を検討した結果を図2に示したが、運動前に比べ運動後

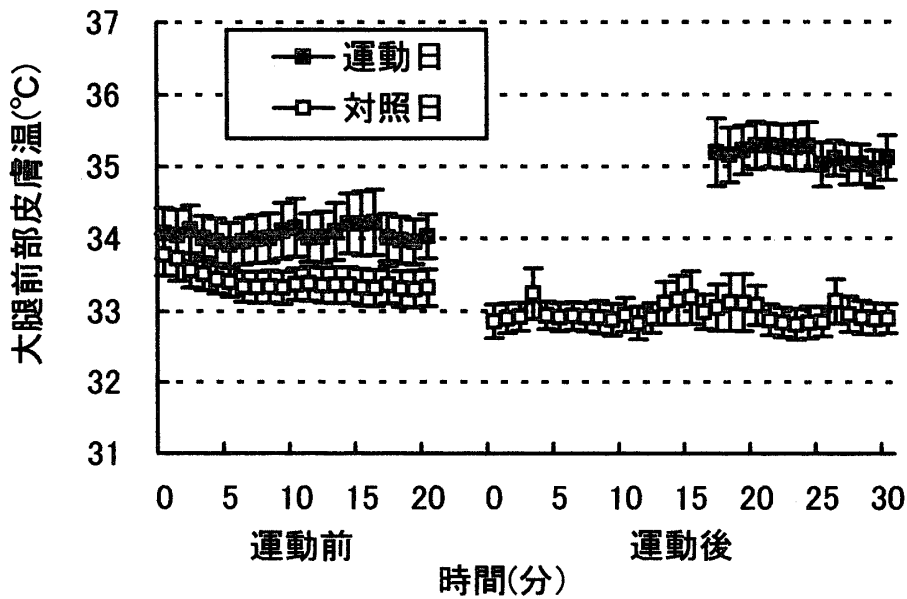


図2 快適自己ペース走前後における大腿部皮膚温の推移 (Mean±SEM, n=8)

に大腿部の皮膚温が増加していることがわかる。図示していないが、上腕外側の皮膚温においても同様の結果が認められた。これらの結果は、運動終了後に末梢部位からの熱放散が活発に行われていることを示すものである。以上のことから、運動を実施した後は、「急激な熱放散→眠気の増加→入眠の促進」というプロセスが生じることが考えられる。この体温効果を入眠に活かすためには、運動を実施するタイミングが重要である。例えば、午前中や午後の早い時間に運動を行った場合には、睡眠までの時間が長すぎるために体温効果が持続しない。実際にこれらの時間帯での運動は睡眠を改善しないことが報告されている<sup>9)</sup>。

一方、深部体温の日内リズムが頂点位相から下降位相にあたる夕方から就床前にかけての時間帯において身体運動を実施した場合には、入眠を促進したとする報告例が多い。小林は健康な男子大学生を対象に、さまざまな時間帯で中等度強度の運動を行わせ、その後の睡眠を検討した。その結果、夕方遅い時間帯（20：00～21：00）に運動を行った日の入眠潜時が有意に短いという結果が得られた<sup>9)</sup>。彼らはまた、入眠に時間を要するpoor sleeperの学生に同様の運動を行わせても入眠の改善が認められること、この入眠改善効果がgood sleeperの学生に比べて著しいことを報告している。

筆者らは、就床2～3時間前にかけて中等度強度の運動を実施させたときの体温変動と睡眠を検討した。その結果、運動終了後から就床時にかけての急激な直腸温低下に続いて入眠潜時の有意な減少が認められた。さらに入眠潜時の結果を被験者ごとに検討すると、深部体温の低下と入眠の関係に興味深い結果が得られた。図3は、就床1時間前から就床時にかけての直腸温変化量と入眠潜時の関係を被験者ごとに示したものである。普段（対照日）から入眠潜時が10分前後と短い被験者では、運動によって急激な深部体温低下を生じさせても大きな入眠短縮

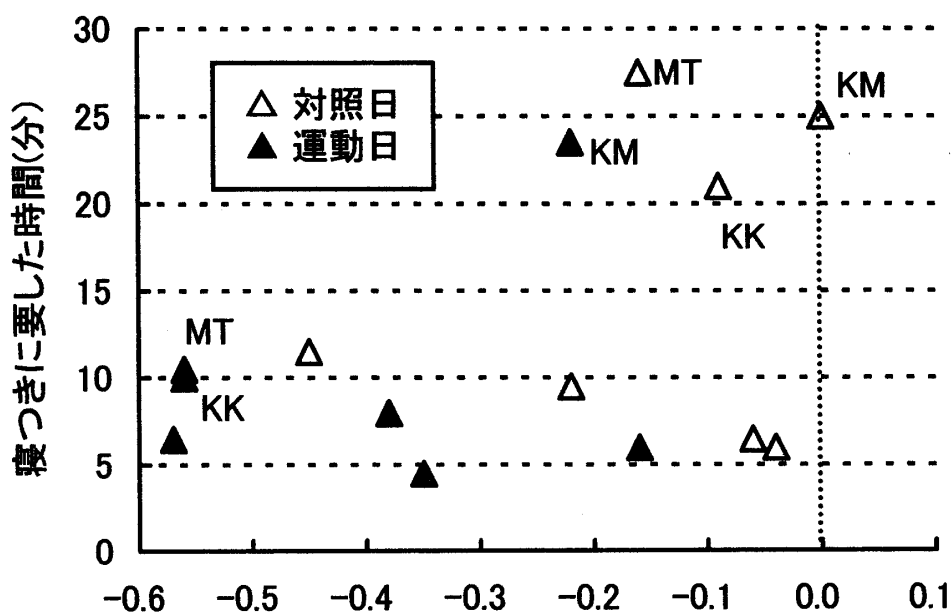


図3 就床前1時間における直腸温変化量(°C)

は認められなかった。一方、普段の入眠潜時が20分以上であった被験者のうち、被験者KK、MTは就床前1時間における深部体温低下度がともに $-0.56^{\circ}\text{C}$ と大きく、入眠潜時は10分以上短縮した。同じく対照日に入眠潜時が25分であった被験者KMでは、遅い時間に就床したために体温低下効果が薄れてしまい ( $-0.22^{\circ}\text{C}/\text{h}$ )、入眠潜時に大きな短縮が認められなかった。これらのデータから、急激に深部体温が低下しているときに就床することが、より効果的に入眠を促進する可能性が示唆される。

また起床後に被験者の主観的な睡眠感を検討した結果、運動日の入眠感得点のほうが高いという結果が得られた (図4)。睡眠ポリグラフによる客観的な評価と主観的な睡眠感が一致しないことがしばしば認められるが、寝つきの時間は認知されやすいため、その良否は睡眠感に大きく影響すると考えられる。

一方、同じ夕方でもサーカディアンリズムの頂点位相より前にあたる上昇位相において運動を実施した場合にはどうであろうか？中等度強度の陸上運動、水中運動を16:00-16:50の時間帯で実施した後の深部体温と睡眠を研究した結果では、深部体温の急激な低下が就床時よりかなり早い時間帯に認められたこと、就床前の体温変動は対照日のものとすでに差が認められなかったこと、両運動日とも有意な睡眠改善が認められなかったことが明らかとなった<sup>16)</sup>。

以上の報告をまとめると、夕方の体温リズムがピークになる時間帯から夕方遅くにかけて運動することが、その後の急激な深部体温低下を伴って入眠を促進する可能性が示唆された。

また高齢者にもこうした生活処方是有効と考えられる。加齢に伴う生理機能の悪化は入眠困難を引き起こす原因であるが、非活動的な生活がこれらの症状を悪化させていると考えられ

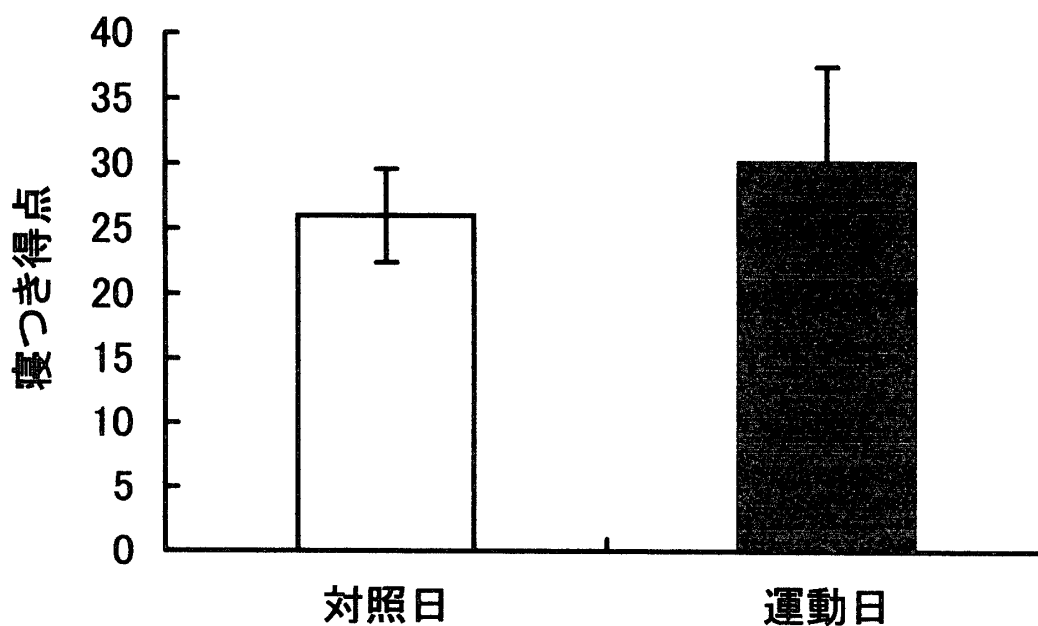


図4 OSA睡眠調査票「寝つき」得点の比較  
(Mean ± SEM, n=7)

る。なぜなら非活動的な生活は、深部体温の日内リズムの振幅を小さくするからである。このような背景から、特に高齢者では日中に活動的な生活を送る重要性が叫ばれている。継続的な運動が高齢者の身体機能を維持する効果があることも考えると、睡眠改善だけではない何重ものメリットが期待できる。半日周期の眠気リズムによって正午過ぎに眠気が高まると言われており、高齢者ではこの時間帯に昼寝をとることが推奨されている。これは昼寝をとることによって眠気を解消し、その後の頂点位相（深部体温がピークに達する時間帯）で活動的な生活を送ることが夜間睡眠に効果的と考えられるためである。田中ら<sup>18)</sup>は、高齢者を対象に昼寝と夕方の運動の組み合わせた生活の効果を検証し、睡眠改善に効果があったことを示している。

## 2. 入浴

入浴は受動的に深部体温を上昇させる生活行動である。入浴後にも末梢部位からの熱放散量が増加して深部体温が低下するという生理反応が生じるため、身体運動と同じ入眠効果が期待できる。就床前に入浴が入眠に及ぼす効果を検討した報告例をいくつか紹介すると、Bunnellら<sup>2)</sup>は、さまざまな時間帯で41℃の湯に1時間入浴させたときの睡眠を検討し、睡眠6時間前に入浴を開始したときに入眠潜時が最も短縮したことを報告した。Kandaら<sup>8)</sup>は、夕方の入浴（湯温40.7℃で普段通りに入浴を行う、ただし10分間は首まで湯につかる）が高齢者・若年者とも入眠改善につながったことを報告した。彼らの研究では、就床前に急激な深部体温低下が認められており、末梢部位からの熱放散増加の関与が示唆された。Jordanら<sup>7)</sup>の研究でも同様に、夕方早い時間帯の入浴によって入眠開始前に深部体温の急低下が見られたが、彼らの研究では入眠潜時を改善するには至らなかった。彼らはこの結果について、就床に伴う体位の変化による影響が大きすぎたために入眠への効果がマスクされてしまったのではないかと説明したが、入眠が良好な被験者で実験を行ったために効果が認められなかったとの解釈も可能である。彼らが用いた被験者は、対照日、入浴日の入眠潜時がともに10分程度のgood sleeperであった。

以上のように、入浴による入眠効果も夕方から就床前に実施した場合に良く認められている。この時間帯は多くの人が入浴を楽しむ時間帯であることから、身体運動よりも手軽に実践できる生活行動であると考えられる。より多くの人が無理なく実施できるという点では、全身浴ではなく足浴による影響を検討したSungら<sup>17)</sup>の報告は大変興味深いものである。施設に入所している高齢者のように、毎日入浴することが困難な人でも、足浴であれば比較的手軽に実施することができる。彼らは就床前に熱い湯への足浴を30分間行わせ、入眠改善が認められたことを報告した。彼らは、足の皮膚温が足浴後から睡眠時にかけて高く維持されたことを報告しており、足浴においても熱放散の増加を介した入眠改善が可能であることを示した。

## 3. 運動や入浴が却って入眠を阻害する例

これまで身体運動と入浴という生活行動を取りあげ、体温変動を介した入眠改善効果につい

て論じてきた。しかし、就床時刻に近すぎる時間帯にこれらの方法によって深部体温を上昇させると身体の興奮とともに覚醒度が高まるため、却って入眠が遅延するという報告がある。例えばBrownman and Tepas<sup>1)</sup>は、就床直前に軽運動を行った条件では、入眠潜時が明らかに延長したことを報告した。彼らの運動は、就床の5分前まで行われており、身体的な興奮の持続が入眠を妨げたことが示唆された。これらの生理的興奮により、Buxtonら<sup>3)</sup>が考えるような体内時計の遅れが生じているかもしれない。

多くの研究によって、就床時の高体温が徐波睡眠を増加させることが報告されている<sup>7)</sup>。この徐波睡眠が出現しているときには心身の積極的な休養が行われる。それゆえ、多くの研究者が徐波睡眠の出現時間を睡眠改善の指標にしている。しかし徐波睡眠増加を目的とした深部体温上昇法が、入眠困難を引き起こす危険性をも含んでいることに注目すべきである。特に体力水準の低い人では、運動や入浴による身体の興奮が終了後にも長時間持続することが考えられる。今後はこうした入眠障害を引き起こすことなく、しかも睡眠を質的に変化させるという観点から生活処方を検討する必要があるだろう。

## V. ま と め

今回は就床前の体温変動が入眠に及ぼす影響について論じてきた。前述したように、入眠困難は非常に多くの人悩んでいる睡眠障害である。本論のなかで体温変動を利用した入眠改善の可能性について論じてきたが、これらの実施方法については課題がまだ残されている。例えば、身体運動であれば対象者の属性（年齢や性別、体力レベルなど）や運動の種類、持続時間、強度、運動のタイミングなどさまざまなファクターによって睡眠への効果が変わるだろうし、入浴による効果も、対象者の属性や各個人の入浴方法、入浴時間、湯温、入浴のタイミングなどによって変わるからである。より良い睡眠を得るための生活処方を構築していくためには、これからもデータを蓄積していく必要があると考える。

## 参考文献

- 1) Brownman CP, Tepas DI. The effects of pre-sleep activity on all-night sleep. *Psychophysiology*, 1976, 13 (6):536-540.
- 2) Bunnell DE, Agnew JA, Horvath SM, Japson L, Wills M. Passive body heating and sleep: influence of proximity to sleep. *Sleep*, 1988, 11: 210-219.
- 3) Buxton OM, L'Heemite-Baleriaux M, Hirschfeld U, Cauter EV. Acute and delayed effects of exercise on human melatonin secretion. *J Biol Rhythms*, 1997, 12: 568-574.
- 4) Campbell SS, Murphy PJ. Relationships between sleep and body temperature in middle-aged and older subjects. *J Am Geriatr Soc* 1998, 46: 458-462.
- 5) 本間研一、本間さと、「生物時計とは何か?」、井上昌次郎監修『眠りのバイオロジー』、LISA増刊、(株)メディカルサイエンスインターナショナル、1998、pp. 24-31.



- 6) 堀忠雄、『快適睡眠のすすめ』、岩波新書、2000、pp.29-54.
- 7) Jordan JO, Montgomery I, Trinder J. The effect of afternoon body heating on body temperature and slow wave sleep. *Psychophysiology*, 1990, 27 ( 5 ):560-566.
- 8) Kanda K, Tochihara Y, Ohnaka T. Bathing before sleep in the young and in the elderly. *Eur J Appl Physiol*, 1999, 80 : 71-75.
- 9) 小林敏孝、快適な睡眠のための行動プログラムの開発. 科学技術振興調整費「日常生活における快適な睡眠の確保に関する総合研究（第Ⅰ期平成8年～平成10年度）」、2000、270-282.
- 10) Krauchi K, Wirz-Justice A. Circadian clues to sleep onset mechanisms. *Neuropsychopharmacology*, 2001, 25 : S92-S96.
- 11) Krauchi K, et al. Functional link between distal vasodilation and sleep-onset latency? *Am J Physiol Regulatory Int Comp Physiol*, 2000, 278 : R741-R748.
- 12) Krauchi K, et al. A relationship between heat loss and sleepiness : effects of postural change and melatonin administration. *J Appl Physiol*, 1997, 83 ( 1 ):134-139.
- 13) McGinty D, et al. Preoptic/anterior hypothalamic warming increases EEG delta frequency activity within non-rapid eye movement sleep. *Brain Res*, 1994, 667 : 273-277.
- 14) McGinty D, Szymusiak R. Keeping cool : a hypothesis about the mechanisms and functions of slow wave sleep. *Trends Neurosci*, 1990, 13 : 480-487.
- 15) Murphy PJ, Campbell SS. Nighttime drops in body temperature : a physiological trigger for sleep onset? *Sleep*, 1997, 20 ( 7 ):505-511.
- 16) Oda S, Moriya K. The effects of recreational underwater exercise in early evening on sleep for physically untrained male subjects. *Psychiat Clin Neurosci* 2001, 55 : 179-181.
- 17) Sung EJ, Tochihara Y. Effects of bathing and hot footbath on sleep in winter. *Physiol Anthropol Appl Human Sci*, 2000, 19 ( 1 ):21-27.
- 18) 田中秀樹他、長寿県沖縄と大都市東京の高齢者の睡眠健康と生活習慣についての地域間比較による検討、*老年精神医学雑誌*、2000、11 ( 1 ):425-433.