



# 入眠潜時短縮にむけた深部体温調節のための 体幹水冷システム

Trunk Water Cooling System for Deep Body Temperature Regulation to Shorten Sleep Latency

江畑辰諒<sup>1)</sup>, 橋本悠希<sup>2)</sup>

Tatsuaki EBATA, and Yuki HASHIMOTO

1) 筑波大学大学院 システム情報工学研究群 (〒305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1, s2420727@u.tsukuba.ac.jp)

2) 筑波大学大学院 システム情報系 (〒305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1, hashimoto@iit.tsukuba.ac.jp)

**概要:** 睡眠不足は心身共に悪影響を及ぼす。この問題を解消するための手段として、我々は入眠にかかる時間(入眠潜時)を短くすることに着目した。睡眠の前後では抹消皮膚温の上昇と深部体温の低下が同時に起きており、両者の体温変化が眠気を引き起こす。本研究では、外部装置からの温度提示によって深部体温の冷却と抹消皮膚温の加熱をそれぞれ行うことで入眠潜時の短縮を目指す。本稿では、深部体温の冷却を行う冷却装置を設計・試作および評価した結果を報告する。

**キーワード:** 睡眠、睡眠潜時、冷却、温度提示

## 1. 序論

### 1.1 背景

人が心身共に健康的な生活を送るうえで、十分に質の良い睡眠をとることは非常に重要である。一方で、日々の就業や家事・育児、あるいは学業などに追われる生活の中で安定的に十分な睡眠時間を確保することは容易ではない。

現代の日本人の睡眠時間について厚生労働省が行った令和元年国民健康・栄養調査報告[1]によると、20歳以上の1日の平均睡眠時間が6時間未満の割合は39.1%と約4割が睡眠時間6時間未満という結果になっている。厚生労働省による健康づくりのための睡眠ガイド 2023[2]によると成人の適正な睡眠時間は6~8時間である。適正な睡眠時間は個人差があるため各々に適した睡眠時間の模索が必要であるとしているが、平均睡眠時間が6時間未満である約4割の成人は睡眠が足りていないと言える。

限られた時間の中で十分な睡眠時間を確保するには就寝から入眠までの時間(入眠潜時)をできるだけ短くすることが望ましい。健康な成人の入眠潜時は10~20分[3]であり、入眠障害を抱えている患者ではさらに長くなる。入眠潜時を短縮する研究として両耳にわずかに違う周波数の音を提示するバイノーラルビートをを用いたものがある[4]。しかし、バイノーラルビートの効果は知覚できる人に限定されるという問題があるため、より普遍的に効果を見

込める手法が必要である。

### 1.2 人の入眠過程

Kräuchらは手足の血管の拡張の程度が急速な入眠のための最良の生理学的予測因子であることを明らかにした。本研究では近位(鎖骨下、大腿、腹、額)及び遠位(手と足)の皮膚温を連続的に測定し、その差を遠位-近位温度勾配(Distal-Proximal skin-temperature Gradient、以下 DPG)とした。遠位皮膚の血流が多くなると遠位皮膚温が上昇し、遠位皮膚での熱放散が活発になる。その結果、近位

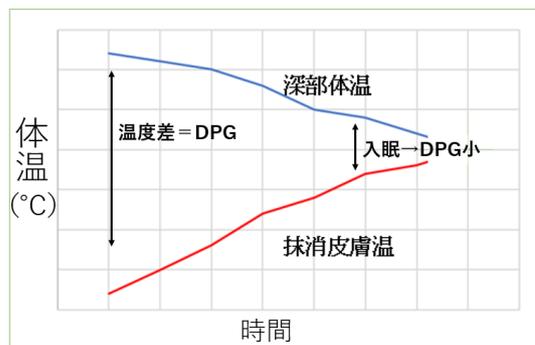


図 1 : 入眠に向けた体温変化の模式図



図2：睡眠の段階（厚生労働省のノンレム睡眠に関する情報[5]をもとに作成）

の体温が低下し、DPG が小さくなる（図 1）。この DPG を遠位皮膚部位における血流の指標とすることで遠位熱損失の間接的な指標とした。消灯から睡眠脳波記録におけるステージ 2(図 2)の出現までを入眠潜時とする実験において、消灯前に DPG が最も正、つまり最も手足の血管拡張が起こっていた場合に入眠潜時が有意に短くなるという結果が得られた[6]。このことから、抹消の皮膚温の上昇と深部体温の低下が眠気につながることを示唆された。

### 1.3 入眠促進の方法

先に述べた Kräuchi らの研究によれば、ヒトが眠気を感じるには末端の皮膚温と体幹部の体温の変化が必要である。そこで、抹消部で体温が上昇、体幹部で体温が低下することで眠気を誘発することができるという仮説を立て、抹消部の加温、体幹部の冷却を行うことで眠気の誘発、ひいては入眠の促進が可能かを検証し、入眠潜時を短くすることを本研究の目的とする。本稿では体幹部の冷却を行うための装置の試作および性能を評価した結果を報告する。

## 2. 体幹部冷却のための装置

### 2.1 冷却手法の選定

特性上、冷却装置には局所的な温度提示が可能なが求められる。空冷の場合、拡散した空気が体幹部以外にも影響することが考えられる。また、ペルチェ素子の場合、冷却面と反対側の発熱面が影響することが考えられる。以上のことを踏まえ、本研究では体幹部の冷却手法として水冷装置を用いる(図 3)。水冷装置は循環する液体による対象の冷却が可能であり、液体自体の温度を下げるための冷却は対象から離して行うことができるため、本研究の手法として適していると考えられる。

### 2.2 試作した装置の構成

試作した装置を図 4 に示す。装置は、身体と接触し循環水と皮膚の間で熱交換を行う部分と循環水を冷却する部分で構成されている。皮膚との熱交換は液送チューブによって行う。循環水の冷却はラジエータ（THERMALRIGHT 社、AE240 ARGB D4）、ファン（PANO-MOUNTS 社、CF12025BLA2PACK）、熱源としての保冷剤から成る部分（図 5）で行う。その他、循環水貯蔵のための水タンク、循環水の動力としてのポンプ

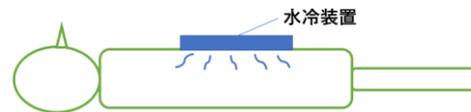


図3：水冷装置による体幹部冷却



図4：試作した水冷装置



図5：ラジエータ部分の構成

(YAMAZEN 社) から構成される。

## 3. 実験

### 3.1 目的

ラジエータでは循環水の放熱がなされる。ここでの循環水の温度が水冷装置の冷却限界を定めることになる。実験ではファンの数、及び熱源としての保冷材の数によって循環水を冷やすのにかかる時間がどのように変化するか、またどこまで水温が下がるかを検証する。

### 3.2 計測装置及び実験環境

実験時の室温は  $25.0 \pm 0.5$  °C、湿度 25% であった。装置全体の様子を図 6 に示す。本実験ではラジエータによる循環水の冷却能力を測るため、液送チューブが机と接していることによる熱の損失を防ぐ目的で断熱材をチューブと机の間に設置した。水温計測には防水形中心温度計（エーアンドディ社、AD-5626）を使用した。

### 3.3 実験手順

- ① 水タンクに室温と同温に調整された水を 300 ml 入れる。
- ② 水温計をタンク内にいれ、表示温度が水温で安定するまで待つ。
- ③ ファンの電源、ポンプの電源、水温計の記録ボタンを入れ 5 分間計測する。

ラジエータに取り付けるファンの数 (1,2) と保冷剤の数 (1,2) の組み合わせ、及び、ファンと保冷剤を用いない



図 6 : 実験環境

場合の計 5 条件に関して、それぞれ 3 回、手順①～③を行った。各計測の間にチューブ、ラジエータ、水タンク内の水を破棄し水の入れ替えを行った。

### 3.4 実験結果

各条件における初期水温と各時刻での水温の差を取り 3 回の計測の平均をとったグラフを図 7～11 に示す。また各条件での冷却前後の水温を表 1 に示す。

## 4. 考察

グラフから、どの条件においても計測開始から 50 秒までに急速に水温が下がっていることがわかる。この特徴的な変化については本実験での手順に原因があると考えられる。はじめ循環水はすべて水タンクの中にあり、計測開始とともにポンプによってチューブ、ラジエータへと運ばれる。循環水がラジエータで冷やされ水タンク内に戻り始めることによって水温の急速な低下が起こっていると考えられる。ポンプを始動してから循環水が水タンクに戻り始めるまでの時間を計測すると約 20 秒であった。そこで各条件のグラフに開始 20 秒地点をプロットすると、どのグラフにおいても最も水温変化の傾きが大きくなっている区間の開始位置と一致していた。また、循環水がタンクに戻り始めた時点では、タンク内の水は半分程度まで減っていた。つまり、はじめタンク内に入れた循環水が全てラジエータを通るまでの時間は循環水がタンクに戻り始めるまでの時間の倍の 40 秒程度だと推測できる。これを踏まえグラフには開始から 40 秒地点もプロットした。すると、最も水温変化の傾きが大きい区間の終わりとおおよそ一致していることが分かった。つまり、計測開始から 40 秒付近までの急速な水温低下は、はじめにタンク内に入れた水が初めてラジエータを通り冷却されたことによって生じていると考えることができる。

次に、表 1 にまとめた初期水温と 5 分間の冷却後の水温をみると、本実験で最良の冷却結果となったのはファ

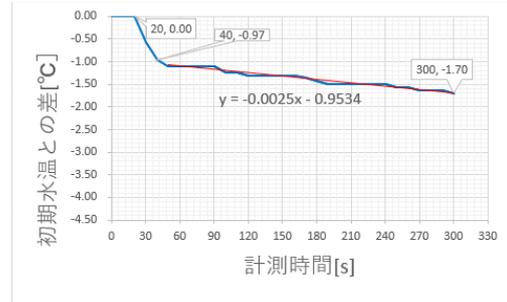


図 7 : ファン、保冷剤なしの水温変化

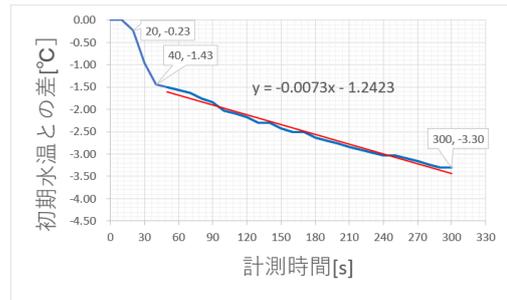


図 8 : ファン 1、保冷剤 1 の水温変化

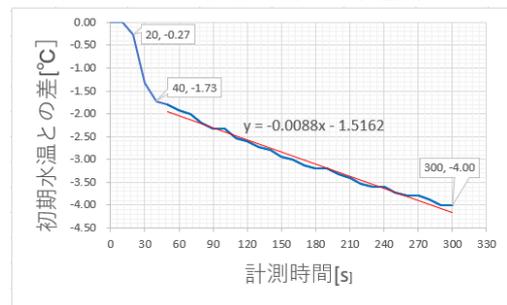


図 9 : ファン 1、保冷剤 2 の水温変化

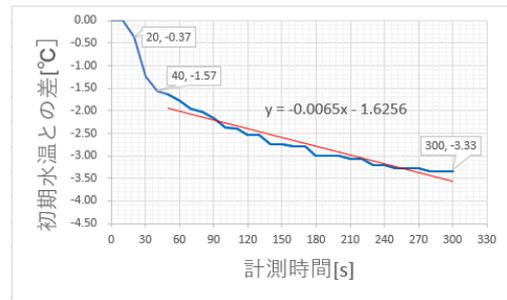


図 10 : ファン 2、保冷剤 1 の水温変化

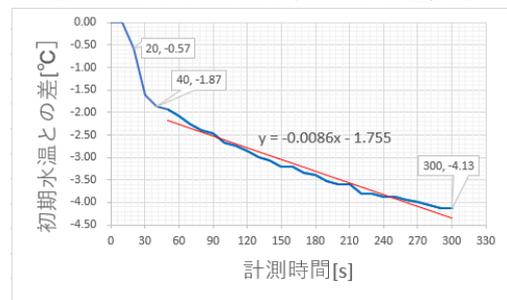


図 11 : ファン 2、保冷剤 2 の水温変化

ン 2 つ、保冷剤 2 つの時、次いでファン 1 つ、保冷剤 2 つの時であった。しかし、上記の議論を踏まえ図 7～11 では計測開始から 50 秒地点をはじめとし、計測終わりまで

表 1：初期水温と冷却後の水温まとめ

ファン、保冷剤なし				ファン1、保冷剤1			
	1回目	2回目	3回目		1回目	2回目	3回目
初期水温[°C]	24.6	25.0	25.1	初期水温[°C]	25.1	24.6	24.9
最終水温[°C]	23.0	23.2	23.4	最終水温[°C]	21.5	21.4	21.8
温度差[°C]	-1.6	-1.8	-1.7	温度差[°C]	-3.6	-3.2	-3.1
ファン2、保冷剤1				ファン1、保冷剤2			
	1回目	2回目	3回目		1回目	2回目	3回目
初期水温[°C]	25.0	25.1	24.8	初期水温[°C]	25.2	25.1	25.0
最終水温[°C]	22.0	21.6	21.3	最終水温[°C]	21.2	21.0	21.1
温度差[°C]	-3.0	-3.5	-3.5	温度差[°C]	-4.0	-4.1	-3.9
ファン2、保冷剤2							
	1回目	2回目	3回目				
初期水温[°C]	24.9	25.2	25.3				
最終水温[°C]	20.8	21.2	21.0				
温度差[°C]	-4.1	-4.0	-4.3				

のデータについて近似直線を引いた。これをみると、保冷剤2つの場合の2条件では温度変化の速度が変わらないことがわかる。このことから、本実験ではファンの数よりも保冷剤の数が冷却能力により大きく寄与しているといえる。この原因として、ラジエータ、ファン、保冷剤の接続方法によるものが考えられる。本実験では図5に示すようにそれぞれをテープで簡易的に留める手法をとっているが、このテープによりラジエータを通り抜ける空気の通り道が塞がれ、また、ファンの空気を吸い込む側も保冷剤に塞がれているためファンの効果が十分に発揮されなかった可能性がある。

## 5. まとめ

本研究では、日本人の睡眠不足を解消するために入眠潜時を短くすることに着目した。ヒトの入眠過程の研究をもとに、加温、冷却することによる体温調節での入眠の促進を研究目的とした。冷却の手法として水冷を採用し、

製作した装置の冷却能力の検証としてラジエータによる循環水の冷却能力がファン、熱源の数によってどのように変わるのかを明らかにした。

## 6. 今後の展望

今回の実験結果では最良の条件でも水温が21°C程度にとどまっているため、ラジエータにおけるファン、保冷剤の取り付け方法を改善することで冷却性能の向上を図る。また、皮膚の過度な冷却は凍傷や痛みの発生などのリスクが生じることから皮膚の温度に応じた冷却の制御を実装する。

## 参考文献

- [1] 令和元年 国民健康・栄養調査報告 厚生労働省 令和2年12月
- [2] 健康づくりのための睡眠ガイド 2023 (案) 厚生労働省 令和5年12月
- [3] 野田明子、宮田聖子：睡眠検査、2017年66巻 J-STAGE-2号 p.95-105
- [4] Zhiwei Fan, Yunyao Zhu, Chihiro Suzuki, Yoko Suzuki, Yumi Watanabe, Junki Endo, Takahiro Watanabe, Takashi Abe: Efficacy of binaural beats with a frequency in the range of the slow oscillations on slow wave sleep induction, 日本睡眠学会第47回定期学術集会、(2022)
- [5] e-ヘルスネット|ノンレム睡眠| <https://www.e-healthnet.mhlw.go.jp/information/dictionary/heart/yk-048.html> 閲覧日 2024年2月8日
- [6] Kurt Kräuchi, Christian Cajochen, Esther Werth & Anna Wirz-Justice: Warm feet promote therapid onset of sleep, Nature, (1999)