



The effect of biological sex difference and seasonal acclimatization on human behavioral thermoregulation in mild hyperthermia

王, 会

(Degree)

博士 (学術)

(Date of Degree)

2025-03-25

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第9100号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/0100496381>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



(別紙様式4)

論文内容の要旨

氏名	王 会
専攻	人間発達専攻
指導教員氏名	近藤 徳彦

論文題目（外国語の場合は、その和訳を併記すること。）

The effect of biological sex difference and seasonal acclimatization on human behavioral thermoregulation in mild hyperthermia

(生物学的性差と季節順化が温熱負荷時の行動性体温調節に及ぼす影響)

論文要旨

Background and purpose

Human beings are facing more challenges with global warming prevailing in the next decades. Modulating body temperature in a heat acute condition is becoming an important issue. During acute heat exposure, thermal homeostasis was maintained by the activation of behavioral and autonomic thermoeffectors are essential to maintain. It has been reported autonomic and behavioral thermoregulation work seamlessly (Schlader & Vargas, 2019). Although autonomic thermoregulation has been studied extensively, we have limited information about behavioral thermoregulation. As the most powerful and diverse thermoregulatory response to modulating heat dissipation (Schlader & Vargas, 2019), behavioral thermoregulation needs further investigation.

People who are exposed to heat conditions regularly exhibit improvements in the autonomic thermoeffector responses and behavioral thermoeffector responses that promote heat loss during the summer compared to the winter. This is often termed seasonal heat acclimatization, and likely occurs in response to the repeated elevations in body temperature associated with residing in the hotter, summer months. The typical autonomic thermoregulatory adaptations following seasonal heat acclimatization include a higher local and whole-body sweating rate, a lower sweat ion concentration, and a smaller rise in core temperature during passive heating and exercise (Banjar et al., 1989; Inoue et al., 1995; Nakamura & Okamura, 1998; Lorenzo & Minson, 2010; Lee et al., 2015; Lei et al., 2021). However, how the behavioral thermoregulate response adapts to seasonal acclimatization is unclear. Moreover, whether the sex difference we observed in

autonomic thermoregulation still exists in behavioral thermoregulation.

Thus, the purposes of this study are below:

- 1) Determine the effect of voluntary electric fan use on body temperatures, autonomic thermoeffector activation, and thermal perceptual responses during passive heating;
- 2) Determine the seasonal acclimatization affects the behavioral thermoregulation;
- 3) Determine the sex difference affects the behavioral thermoregulation;
- 4) Determine the adaptation magnitude of thermal behavioral response induced by seasonal acclimatization is the same between males and females.

Method

This study investigated the effect of sex differences and seasonal acclimatization on behavioral thermoregulation in mild heat conditions. Twelve males and twelve females performed passive heating for 50 min in a climatic chamber set at 27°C and 50 % RH respectively. Every participant underwent one preliminary session and two experiment trials in winter then repeated it in summer. In Fan trials, participants were allowed to use the fan to keep them feel comfortable, and not allowed in No fan trials. The time when the 1st cool seeking behavior occurred, the cumulative times the fan was turned on, the cumulative times of pressing the button, and the total cooling time were recorded as behavioral parameters. Heart rate, blood pressure, Local skin temperature (calf, thigh, chest, forearm, abdominal, and forehead), rectal temperature, local sweat rate (chest, and forearm), local skin blood flow (forearm and chest), local skin conductance (forearm and chest), the number of active sweat glands, the sweat output per active sweat glands, whole-body sweat rate, and sweat ion will be continually measured. After that, the SkBF max will be measured for 30 min. Thermal perception (thermal sensation, thermal discomfort, and wetness) was measured every 10 min during passive heating. The Fan and No fan trials were performed in a fixed order and the season was repeated in a random order. It is expected that the differences in sex and season would affect behavioral thermoregulation.

Results from this research

We could conclude the following new findings throughout this research:

- 1) Based on the results from study 1, we concluded that voluntary use of an electric fan is an effective thermoregulatory behavior that can reduce skin temperature, modify heat loss responses, and improve perceptions of thermal sensation and wetness. Still, it did not modify the eccrine sweating from the glandular level in this study.
- 2) Based on the results from study 2, we concluded that females had a stronger desire for cool seeking behavior, and cool seeking behavior was used to a greater

extent (i.e. more sensitivity and cooling time is longer) in the same heat condition compared to males while the onset of thermal behavior was similar.

3) Based on the results from study 3, we concluded that seasonal acclimatization affects behavioral thermoregulation. Specifically, cooling seeking was initiated at a lower increment of T_{re} , T_{sk} , and T_b , and it was used to a greater extent in summer compared to winter.

4) Based on the results from study 4, we concluded that the developed magnitude from winter to summer of cool seeking behavior did not show the difference between males and females. Moreover, the pilocarpine-induced sweat rate developed a higher magnitude in males compared to females from winter to summer during environmental heat exposure whilst the local sweat rate did not show the difference.

General conclusion of this study

This Based on the reservations from this research, we concluded that behavioral thermoregulation was modified by sex-related differences and seasonal acclimatization. Specifically, thermal behavior was used to a greater extent in females (compared to males) and summer (compared to winter). However, the adapted magnitude by seasonal acclimatization is not different between males and females.

(注) 3,000～6,000字（英語の場合は1,000～2,000語）でまとめること。

論文審査の結果の要旨

氏 名	王 会		
論文題目	<p>The Effect of Biological Sex Difference and Seasonal Acclimatization on Human Behavioral Thermoregulation in Mild Hyperthermia</p> <p>生物学的性差と季節順化が温熱負荷時の行動性体温調節に及ぼす影響</p>		
判 定	合 格・不 合 格		
審 査 委 員	区 分	職 名	氏 名
	主 査	教授	近藤 徳彦
	副 査	教授	長ヶ原 誠
	副 査	准教授	佐藤 幸治
	副 査	准教授	木村 哲也
	副 査	Indiana University 准教授	Zachary Schlader
要 旨			
<p>本博士論文は、人の体温恒常性を保つための機能、体温調節に関する研究で、特に、人（若年者）において系統的な研究が遅れている行動性体温調節が生物学的性差と季節順化にどのように影響されるのかを明らかにしたものである。本論文は8章から構成されており、序論である第1章、文献研究である第2章、目的として第3章、各目的に対する研究（第4章から7章）、総括の第8章となっている。</p> <p>第1章では、地球温暖化に伴い世界では熱波による被害が拡大しており、日本では酷暑の夏での熱中症が大きな社会問題となっていることを指摘し、人の体温調節の重要性を述べている。また、スポーツ活動や労働など女性の屋外での活動割合が全体的に多くなっている一方、女性は男性と比較して体脂肪が多い、体力が低いなどから高温化での活動時には熱中症になる可能性が高い。このことから、女性の体温調節特性、特に、行動性体温調節に関する研究は、現在において益々重要となっていることを指摘している。</p> <p>第2章では、文献研究により人の体温調節の不明な点を明らかにしている。まず、体温調節には自律性体温調節と行動性体温調節があるが、人での前者の研究は進んでいるが、後者においては動物を対象とした研究が多く、人での研究が遅れていることを示している。また、日本の夏での日常生活でみられる扇風機等の利用行動は行動性体温調節として考えられるが、その評価方法が不十分であること、生物学的性差や季節変化が人の行動性体温調節に及</p>			

ばす影響は不明であること、さらに、季節変化（夏への適応）程度が生物学的性差によって異なるかどうかにも明らかにされていないことを指摘し、これらをもとに第3章では、各研究の目的・仮説を述べている。

第4章では、日常的な扇風機利用による行動性体温調節の評価を膝から下を湯につける負荷により実施している。特に、行動性体温調節を引き起こす扇風機利用のスイッチと稼働時間の工夫により、扇風機利用のタイミング・回数・時間等で行動性体温調節の評価が可能であることを示した。

第5章では、生物学的性差が第4章で用いた行動性体温調節に及ぼす影響を検討し、女性（卵胞期）は男性と比較してこの調節をより多く利用することを明らかにし、一方、行動性体温調節に影響する温冷感等は生物学的性差が見られなかったことを示した。

第6章では、季節順化（夏への適応）が行動性体温調節に及ぼす影響を検討し、夏のこの調節が冬のそれより優れていること明らかにし、一方、第5章と同じように、行動性体温調節に影響する温冷感等は季節順化に影響されないことを示した。また、第7章では、行動性体温調節の季節順化程度に生物学的性差が存在するか検討し、この程度には男女差がないことを明らかにした。

第8章では、本論文によって得られた新しい所見を明確にし（行動性体温調節の生物学的性差、季節順化および季節順化の男女差の有無）、本研究の社会的意義と今後の課題を示している。

本論文の一部として以下の査読付き学術論文3編を発表しており、博士学位申請の基本的条件を満たしている。

Wang H, Lei TH, Schlader ZJ, Mündel T, Amano T, Fujii N, Nishiyasu T, Kondo N. Effect of voluntary electric fan use on autonomic and perceptual responses to lower leg passive heating in humans. *Journal of Thermal Biology*, 2023. doi: 10.1016/j.jtherbio.2023.103724.

Wang H, Schlader ZJ, Lei TH, Mündel T, Amano T, Fujii N, Nishiyasu T, Cotter J, Kondo N. The effect of seasonal heat acclimatization on cool-seeking behaviour during passive heat stress in young adults. *Experimental Physiology*, 2024. doi: 10.1113/EP091969.

Wang H, Schlader ZJ, Lei TH, Mündel T, Amano T, Fujii N, Nishiyasu T, Kondo N. The effect of biological sex on cool seeking behavior during passive heat stress in young adults. *European Journal of Applied Physiology*, 2025. doi: 10.1007/s00421-025-05702-8.

本論文は、研究が遅れている暑い環境での人の行動性体温調節を系統的に検討している点で研究の意義が高い。また、この調節が生物学的性差と季節順化に影響されることを初めて明らかにした点はこの分野の研究発展に大きく貢献し、人の環境適応能の新しい可能性を示した意味で、学術的な意義は大きい。

以上により、王会氏は博士（学術）の学位を得る資格があると認める。