浸水安静時における体温調節反応の日周変動

丹 羽 健 市

CIRCADIAN VARIATION OF THERMOREGULATORY RESPONSES DURING REST IN WATER

KEN-ICHI NIWA

Abstract

To observe possible influences of the biological clock on thermoregulatory responses, heat balance was measured 6 healthy students wearing only trunks during 30 min of immersion in water at a temperature of 21°C in both the rising phase (11:00~13:00) and the falling phase (23:00~1:00) of body temperature.

Heat production was higher in the rising phase than in the falling phase. Duration of shivering was longer in the rising phase than in the falling phase. Dry heat loss was nearly constant, 163 to 166 W/m² in both phases. Body heat storage was negative in both phases, but higher in the falling phase than in the rising phase.

The mean body temperature, however, changed to a similar extent in the rising phase and in the falling phase when the circadian temperature variation was balanced.

Analysis of these results implies that the increased shivering in the rising phase is brought about by changes in the sensitivity of the thermoregulatory response.

(Jpn. J. Phys. Fitness Sports Med. 1992, 41: 255~260)

key words : Circadian variation, Thermoregulatory responses, Immersion

I. は じ め に

体温は一日を周期として変動することは古くから知られている。体温が変動するのはその原因が何んであれ、最終的には熱産生と熱放散の不均衡による。Aschoff et al.(1967)¹⁾はヒトを外部環境から完全に遮断し、時刻を示す全ての因子から隔離しても、体温の自由走行性リズム(24.2~25.0時間)が観察されることを報告した。このような事実から、最近では、体温日周変動は筋活動や食物摂取による受動的なものではなく、生体固有の体内時計に起因し、それが外界の同調化因子(明暗、温度、湿度、気圧等)を利用して正確な24時間周期のリズムを呈すると解されている。

それでは、生体が水中で安静状態を保持している際の体温調節反応は体温日周変動の各位相でどのように異なるのであろうか。従来、水中安静時

の体温調節反応については数多く研究され、体温調節反応の各因子と水温との関係が明らかにされているが^{5,11,13)}、寒冷によるふるえや熱放散などにおいて、1日の時刻に注意して行われた研究は極めて少ない。

本研究は健康な男子大学生を対象に一定水温下で安静を保持している際の体熱平衡が時刻によってどのように変動するかを観察し、それが体温調節系の動作特性のいかなる変化によるのかについて検討した。

II. 実 験 方 法

被験者は20~23歳の健康な男子大学生(運動鍛練者)6名で、その身体的特徴は身長 179.3±5.0 cm(平均±標準偏差)、体重 72.2±7.5 kg、体脂肪率 8.7±0.7%であった。実験に先立ち、各被験者の体温日周変動を観察した(図1)。その結果、

Fig. 1. Circadian variation of oral temperature in 6 subjects. Bars indicate the time of day for the experiment.

体温は3:00から6:00の間が最も低く(平均35.8℃),その後,上昇に転じ,20:00前後に最高値(平均36.8℃)に達した後,下降するという日周リズムが観察された。そこで,実験は体温日周変動の同レベル,すなわち体温上昇期(11:00~13:00)と下降期(23:00~1:00)に環境温25℃の室内に設置した木製水槽(水温21℃)の中で30分間の椅座位安静を保持(首まで浸水)させ,その際の体温調節反応を測定,観察した。

実験に際し,被験者は環境温25℃の室内で約1時間の座位安静を保持した後,熱電対の貼付並びに挿入,呼吸マスクの装備を行なった。装備終了後,被験者は直ちに入水し実験を開始した。測定項目とその方法は以下の通りである。

呼吸採取は5分ごとに異なるバックに採取した。採取した呼吸は直ちに1回転10lの乾式実験用ガスメーターによってガス量を計量し,その一部をサンプルとして,労研式大型呼吸ガス分析器によりO₂およびCO₂濃度を分析し,酸素摂取量ならびに炭酸ガス排出量を算出した。

直腸温(T_{re})の測定は熱電対を直腸内に8~10cm挿入し,また,皮膚温(T_s)は身体8部位に熱電対を貼付し,それぞれ自動精密温度測定器で1分毎に打点記録した。さらに出力をデジタル信号に変換し,マイクロコンピュータによりHardy & DuBois. (1938)⁹⁾の算出式を用いて平均皮膚温($\bar{T}_s = 0.07T_{head} + 0.14T_{arms} + 0.05T_{hands} + 0.17T_{back} + 0.18T_{chest} + 0.19T_{thighs} + 0.13T_{legs} + 0.07T_{feet}$)と平均体温($\bar{T}_b = 0.65T_{re} + 0.35\bar{T}_s$)⁹⁾を算出した。†

体熱平衡は次式により算出した。

$$M = E_{resp.} \pm C \pm K \pm S \quad (\text{単位は } W/m^2)$$

代謝量(M)は酸素摂取量と二酸化炭素排出量より,呼吸気道からの蒸発性熱放散量は $E_{resp.} = 0.023M(44 - p_a)$ の式により計算した(M:代謝量, p_a :環境の水蒸気圧)。また,体表面からのdryの熱放散($\pm C \pm K$)は代謝量から蒸発性熱放散量と貯熱量(S)を差引いて間接的に求めた。貯熱量

(S)は平均体温の変化を求め $\frac{d\bar{T}_b}{dt} \times \text{比熱}(0.83) \times$

体重の式より計算した。

ふるえは胸部に装置したマイクロバイブレーションを通して,身体の微小な震動を実験中連続記録し,その持続時間を計測するとともに,ふるえが生じた際にサインを送るよう被験者に指示した。また,各測定時刻(水温21℃)での体温調節反応には本来体温日周変動を起すための変化量も含まれている。その変化量を算出するために体熱平衡が維持される水温(33℃)下で各測定時刻での体温調節反応を測定した。結果は全て平均±標準偏差で示した。

III. 実験成績

A. 各測定値の一般的概要

図2~3には酸素摂取量,ふるえ持続時間,直腸温及び平均皮膚温の時間経過を,また,表1には終了直前の反応水準ならびにその変化量を示した。酸素摂取量は体温日周変動の各時刻の場合とも浸水直後から時間経過に伴って漸増し,終了直前の値は体温上昇期で $593 \pm 189 \text{ ml/min}$,下降期で $518 \pm 242 \text{ ml/min}$ であり,体温上昇期の方が平均値で約14%であった。

ふるえは浸水開始2~3分後に被験者全員に認められ,時間経過に伴ってその出現は増大した。ふるえ持続時間は体温下降期に比して上昇期の方が常に高く,終了直前の値は体温下降期で $624 \pm 28.6 \text{ sec/5 min}$,上昇期で $102.4 \pm 27.0 \text{ sec/5 min}$ であり,上昇期の方が平均値で64%大であった。

直腸温は体温日周変動の各期とも浸水後,6~7分を境に下降に転じ,その低下は体温上昇期で30分目に $-0.38 \pm 0.35^\circ\text{C}$,下降期で30分目に

Fig. 2. Oxygen intake and duration of shivering during 30-min immersion at water temperature of 21°C.

Fig. 3. Rectal and mean skin temperatures during 30-min immersion at water temperature of 21°C.

Table 1. Changes in oxygen intake, rectal and mean skin temperature, and duration of shivering in the rising (12:00) and in the falling phases (24:00) of body temperature.

	Time of day	
	12:00	24:00
Oxygen intake (ml/min)	593±189	518±242
Rectal temperature (°C)	36.76±0.48	36.73±0.69
Δ Rectal temperature (°C/30 min)	-0.38±0.32	-0.56±0.41
Mean skin temperature (°C)	24.01±0.23	23.96±0.24
Δ Mean skin temperature (°C/30 min)	-2.35±0.58	-2.41±0.69
Duration of shivering (sec/30 min)	331±186	187±104

Values at the end of 30-min water immersion.

-0.56±0.41°Cと下降期の方が大であった。また、終了直前の直腸温は体温上昇期で36.76±0.48°C、下降期で36.73±0.68°Cと両期間に差異は認められなかった。

平均皮膚温は浸水直後から直線的に下降し、10分を境に、その低下は軽減した。低下は体温上昇期で30分目に-2.35±0.58°C、下降期で30分目に-2.41±0.69°C、また、終了直前の平均皮膚温は

体温上昇期で24.01±0.23°C、下降期で23.96±0.24°Cであり、両期間に差異は認められなかった。

ふるえ発現閾値平均体温は体温日周変動の各時刻に差異は認められないが、同一平均体温に体するふるえ持続時間は体温上昇期に大であった(図4)。

B. 体熱平衡

図5に熱産生ならびに呼吸気道からの蒸発性熱

Fig. 4. Relationship between body temperature and duration of shivering during water immersion in the rising (12:00) and in the falling phases (24:00). Values are means of 6 subjects.

Fig. 5. Heat production and heat loss during 30-min immersion at water temperature of 21°C. Values are means $\pm$ SD. a.m. and p.m. indicate the rising (12:00) and the falling phases (24:00) of body temperature.

放散量, 体表面からの dry の熱放散量そして貯熱量を示した。熱産生量は体温上昇期で 94 ± 34 W/m², 下降期で 84 ± 27 W/m² と上昇期の方が平均値で約12%大であった。呼吸気道を介しての蒸発性熱放散量及び体表面からの dry の熱放散量は体温日周変動の各期に差異は認められなかった。貯熱量は体温日周変動の各期ともに負の値を示し、体温上昇期で -75 ± 21 W/m², 下降期で

-87 ± 19 W/m² と下降期の方が平均値で16%大であった。

IV. 考 察

体温は熱産生と熱放散が等しければ一定である。したがって、体温日周変動における体温の上昇又は下降は熱産生の増減あるいは熱放散の増減のいずれか1つ, またはそれらの組合せの結果である。

著者は先に、体温日周変動の各時刻に暑熱ならびに寒冷曝露を行った際の体温調節反応を観察した。その結果、暑熱実験では蒸発による熱放散は体温下降期に大であり、寒冷実験でのふるえの回数及び持続時間は上昇期に大であった。しかし、これらの差異も体温日周変動を生じるための熱放散あるいは熱産生の増減を考慮に入れると、寒冷ならびに暑熱に対する反応の時刻による差はわずかであることを報告した¹²⁾。しかしながら、生体が浸水した際の熱の移動は大気中と同じ温度条件とはいえ、水と空気の物性の差により、熱放散の上でかなりの相違がみられる。そこで、本報告では生体が浸水した際、時刻によって体温調節反応がどのように変動するかを熱平衡の側面から定量的に検討したものである。

従来、大気中での体温日周変動は、少なくとも温熱中間帯では熱産生の増減によるよりは、むしろ放射、対流による熱放散が周期的に変化する結果であると指摘されている²⁾。本実験での dry の熱放散は各時刻ともほぼ一定であるが、熱産生は体温下降期に比して上昇期の方が大で、直腸温の低下は体温下降期に大であった。これらの事実は同一水温下で安静を保持しても体温日周変動の各期で体温調節反応が異なることを明示している。

一般に、生体が寒冷環境に曝されると、体温下降を防ぐために、末梢血流の減少に伴う皮膚温下降とふるえによる代謝性熱産生の増大で対処することは知られている。Erikson et al.⁸⁾(1956) は代謝が高進する臨界環境温度は裸体で26~28℃, Craig & Dvorak (1968)⁷⁾ は30℃の水温でふるえが起こると報告し、Benzinger (1969)⁴⁾ は熱産生反応である寒冷ふるえは皮膚の冷却によって誘発

され、熱産生反応には皮膚温下降が重要な役割を果たすことを指摘した。

本実験でのふるえは被験者全員に認められ、その持続時間は時間経過に伴って延長し、体温下降期に比して上昇期の方が平均値で64%大であった。体温上昇期の熱産生の増大は主としてふるえの差が反映しているのであろう。それでは、熱産生によって体温は何度上昇し、熱放散によって何度低下したのであろうか。被験者の平均体重72 kg、人体の比熱0.83として計算した。その結果、熱産生による体温上昇度は体温上昇期で平均1.31℃/hr、下降期で1.17℃/hr、一方、熱放散による体温低下度は体温上昇期で-2.36℃/hr、下降期で-2.39℃/hr低下したことになり、結局、体温は体温上昇期で1.05℃/hr、下降期で1.22℃/hrそれぞれ低下したことになる。

しかしながら、上記の体温調節反応には測定30分間における体温日周変動を起すための変化量も含まれている。そこで、体熱平衡が維持される水温(33℃)における平均体温の日周変動、すなわち体温上昇期の0.04℃/hrの上昇度、下降期の0.1℃/hrの低下度を用いて補正した。その結果、体温上昇期では1.09℃/hr、下降期では1.12℃/hrそれぞれ低下したことになる。しかし、これらの差異も、体温日周変動を起こすための熱放散、熱産生を考慮にいれると、水温21℃に対する反応の時刻による差はほとんど認められなかった。

それでは、体温日周変動の各時刻で体温調節系の動作特性はどのように異なるのであろうか。平均体温に対するふるえ持続時間との関係から検討した。その結果、体温日周変動の各時刻間に、ふるえ発現閾値平均体温には差異は認められないが、同一平均体温におけるふるえ持続時間は体温上昇期に大であった。これらの事実は、体内時計からの体温調節系の動作様式への影響は体温調節反応の感度の移動にあることを示唆している。

Hildebrandt(1974)¹⁰⁾は結腸温と皮膚血流量の日周変動について報告し、前額の血流量は深部体温と同様の日周変動を示すが、手と足の皮膚血流量は深部体温が上昇する朝に減少し、体温が下降する夜では増加することから、体温日周変動は朝

の体温上昇期と夜の体温下降期では体温調節機構が異なるのであると指摘した。Cabanac et al. (1976)⁶⁾は目標温度の日周変動は体温日周変動に先行して生じると指摘している。

結局、体温日周変動の各時刻に一定水温下で安静を保持した際の体温変動は、主として熱産生の増減によって起り、それはまた、寒冷によるふるえの感受性が1日周期で変動する結果である。しかしながら、これらの差異も体温日周変動を生じするための熱放散あるいは熱産生の増減を考慮に入れると、時刻による反応の差はわずかであるといえる。

V. 要 約

浸水安静時における体温調節反応の日周変動を明らかにするために、健康な男子大学生を対象に、体温上昇期と下降期に一定水温(21℃)下で安静状態を保持し、その際の体温調節反応を観察するとともに、熱平衡の側面から体温調節系の動作様式に検討を加えた。得られた結果は以下の通りである。

1. 熱産生量は体温上昇期に大で、dryの熱放散量は体温日周変動の各時刻に差異は認められなかった。
2. ふるえは体温日周変動の各時刻ともに時間経過に伴って増大し、特に、その傾向は体温上昇期に著明に認められた。
3. 貯熱量は体温日周変動の各時刻ともに負の値を示し、体温下降期に大であった。
4. 平均体温に対するふるえ持続時間の関係では、ふるえ発現閾値平均体温は体温日周変動の各時刻間に差異は認められないが、同一平均体温に対するふるえの感度は体温上昇期に大であった。

稿を終えるにあたり、献身的な協力を惜しまなかった被験者の諸兄に深謝致します。

(受付 平成3年10月26日)

参 考 文 献

- 1) Aschoff, J., Gerecke, U. and Wever, R. (1967): Desynchronization of human circadian rhythms.

- Jap. J. Physiol., **17**, 450-457.
- 2) Aschoff, J., Biebach, H., Heise, A. and Schmidt, T. (1973) : Daynight variation in heat balance. In "Heat loss from animals and man." (Editors : Monteith, J. L. and Mount, L. E.), Butterworths, London, pp. 147-172.
 - 3) Burton, A. C. (1935) : The average temperature of the body tissues. J. Nutr., **9**, 261-280.
 - 4) Benzinger, T. H. (1969) : Heat regulation : Homeostasis of central temperature in man. Physiol. Rev., **49**, 671-759.
 - 5) Canon, P. and Keatinge, W. R. (1960) : Metabolic rate and heat loss fat and thin men in heat balance in cold and warm water. J. Physiol., **154**, 320-344.
 - 6) Cabanac, M., Hildebrandt, G., Massonnet, b. and Strempel, H. (1976) : A study of the nythemeral cycle of behavioural temperature regulation in man. J. Physiol., **257**, 275-291.
 - 7) Craig, A. B. and Dvorak, K. M. (1968) : Thermal regulation during water immersion. J. Appl. Physiol., **25**, 28-35.
 - 8) Erikson, H., Krog, J., Anderson, K. and Scholander, P. F. (1956) : The critical temperature in naked man. Acta Physiol, Scand., **37**, 35-39.
 - 9) Hardy, J. D. and DuBois, E. F. (1938) : The technic of measuring radiation and convection. J. Nutr., **15**, 461-475.
 - 10) Hildebrandt, G. (1974) : Circadian variations of thermoregulatory response in man. "Chronobiology" (Editors : Schering, L. E., Halberg, F. and Pauly, J. E.), Georg Thieme, Stuttgart. pp. 234-240.
 - 11) Keatinge, W. R. (1960) : The effects of subcutaneous fat of previous exposure to cold on the body temperature peripheral blood flow and metabolic rate on man in cold water. J. Physiol., **153**, 166-173.
 - 12) 丹羽健市, 中山昭雄, 緑川知子 (1986) : 女子における寒冷, 暑熱に対する体温日周変動. 山形大学紀要, **9**, 97-107.
 - 13) Witherspoon, J. M., Goldman, R. E. and Breckenridge, J. R. (1971) : Heat transfer coefficients of human in cold water. J. Physiol., **63**, 459-462.