競泳選手における水分代謝の日内変動と身体活動量の関係

村松愛梨奈[1)]　寺本圭輔[2)]　乙木幸道[3)]
千葉正[4)]　加藤玲香[5)]　井川正治[6)]
1）愛知教育大学大学院　2）愛知教育大学　3）株式会社ファインライズジャパン
4）修紅短期大学　5）愛知教育大学附属高等学校　6) 日本体育大学

The relationship between circadian rhythm of water turnover and physical activities in swimmer

Erina MURAMATSU[1)]　Keisuke TERAMOTO[2)]　Kodo OTOKI[3)]
Tadashi CHIBA[4)]　Reika KATO[5)]　Shoji IGAWA[6)]
1）Graduate School of Aichi University of Education　2）Aichi University of Education　3）Fine Rise Japan.Co.,Ltd.
4）Shuko Junior College　5）Senior High School attached to Aichi University of Education　6）Nippon Sports Science University

キーワード：水分代謝，日内変動，身体活動量
Key words：Water Turnover, Circadian Rhythm, Physical Activity

Ⅰ．緒言

水は人体の主要成分であり，生命に欠かすことはできないものである[1)]。生体中の水分を体液（body fluid）といい，その量は成人では体重の約60%を占める。体液は細胞の中に存在する成分（細胞内液）と細胞の外に存在する成分（細胞外液）に分けられ，細胞外液はさらに，血管内に存在する血漿と血管外の間質液に分類される。体液は，これらの区分に固定されておらず，相互に交換されながら平衡状態を保ち，内部環境のホメオスタシスを維持している[2)]。また，内部の水分の移動だけでなく，外部からの水分出納も内部環境のホメオスタシスを維持する役目を担っている。1日の水分出納（体水分代謝回転：water turnover：WT）は，年齢[3-7)]やボディサイズ[5, 8)]，身体活動[7, 9-19)]，環境[13, 20)]に影響を受けており，特に身体活動は発汗や呼吸による不感蒸泄を促進させるため，水分出納に及ぼす影響は大きい。

身体活動とWTの関係において，Shimamotoら[15)]は一般若年男性と同年齢の長距離ランナーのWTを比較し，日常における身体活動量の違いがWTに影響を及ぼすことを示した。また，Fuschら[12)]はトレッキングの鍛錬者を対象にWTを測定し，運動強度を高くすることが代謝水の産生や不感蒸泄の亢進に繋がり，WTの亢進の一因になると考察している。競技者における先行研究[10, 14, 15, 19)]では，身体活動量の多い競技者と同年齢の運動習慣のない人のWTを比較し，競技者のWTが高いレベルにあることを報告している。これらのことから，身体活動量，身体活動レベルはWTに影響し，特に競技者はWTが一般人と比較して高いレベルにあるため，水分の入れ替わりが速く，WTを検討する必要性も高いと考えられる。また，一般人と比べ競技者はトレーニングを行う日，時間により身体活動量は大きく異なり，1日毎または1日の中のWTの変動も大きいと考えられる。

しかしながら，先行研究では1週間の平均の1日のWTのみが算出されており，トレーニングを含む時間や睡眠時など競技者における1日のWTの変化（日内変動）については明らかにされていない。WTの測定方法は，体内にトレーサーとして重水（D_2O）を投与し，体水分中のトレーサー濃度の減衰から算出する重水希釈法がゴールドスタンダードとされている。この方法は測定期間の

前後に2回サンプルを採取するtwo-point法 と測定期間中毎日サンプルを採取するmulti-point法が一般的である[21)]。先行研究の多くは，これらの方法で採取されたサンプル中のD_2O濃度を赤外分光光度計によって定量し，生体内での半減期および1日当たりのWT率（%）を決定することにより，1日に入れ替わる体水分量（L/day）を算出している。この赤外分光光度計は，物質に赤外線を照射して吸収される赤外線の波長を測定し，化合物を定量する装置であり，直接的に同位体を測定できないため，1日毎のWTやWTの日内変動を算出するのは困難である。近年ではWTを測定する際に同位体比質量分析計を使用し，同位体の分析がより精確に行うことができるようになったが，この分析機器により算出したWTについての研究は未だ少ない。これらの理由により，競技者のWTの変動については検討されなかった可能性が考えられる。

そこで本研究では，重水希釈法を用いて，サンプル採取回数を1日3回に増やすことに加え，同位体比質量分析計を用いて分析を行い，競技者におけるWTの日内変動と身体活動量の関係を明らかにすることを目的とした。

Ⅱ．対象と方法

1．被験者

被験者は大学において競泳競技を行っており，健全なライフスタイルを有した健康な男性1名（23歳），女性1名（22歳）を対象とした。研究期間中，被験者には運動，食事，飲水，日常のライフスタイルのパターンを研究参加前と変えないよう指示した。研究期間は，2009年8月20-27日の8日間であり，実験初日の重水（D_2O）投与日をday0とし，採尿1-7日目をday1-day7とした。また，トレーニングはday2，4，6，7に行った。研究期間中はインシーズン中の高強度トレーニング期間であった。また，実験に先立ち，被験者に研究内容を詳しく説明し，同意を得た。

2．WTの測定

WTの測定は重水希釈法により行った。この方法は，D_2Oを経口投与し，尿中の重水素（^2H）濃度を測定することでWTを測定する方法で，被験者は一定の時間に尿サンプルを採取するだけで生活に支障がなく，精確度も高いことが知られている。

day0の前日の午後8時から絶飲，絶食とし，就寝までは水のみを摂取可能とした。そして，day0に被験者は，朝食をとらず午前4時30分に実験室に来室しベースライン尿を採取，その後，安静状態を保ち，午前5時に推定体水分量1kgにつき0.05gのD_2Oを経口投与した。平衡状態の値を明らかにするために，午前6時から1時間おきに午前11時まで計6回採尿を行い，午前9時までは飲食禁止とした。その後，午後2時，5時，8時，9時，11時にも採尿を行った。

また，本研究ではWTの日内変動を評価するために，day1からday7まで連続して朝9時から6時間ごとに1日3回採尿を行った（各日9時, 15時, 21時）。day1は上記の時間に加えて，正午，午後6時にも採尿を行った。また，採尿期間中7日間（day1－7）は, 起床後から午前9時の採尿までは，絶飲，絶食とした。採尿の時間は表1に示した。採取した尿サンプルは分析までプラスチック製の容器で冷蔵保存した。

Table 1. Urine sampling time

	Day0	Day1	Day2-7
4:50	●		
5:00	D_2O ingestion		
6:00	●		
7:00	●		
8:00	●		
9:00	●	●	●
10:00	●		
11:00	●		
12:00		●	
13:00			
14:00	●		
15:00		●	●
16:00			
17:00	●		
18:00		●	
19:00			
20:00	●		
21:00	●	●	●
22:00			
23:00	●		

● : collecting urine

採取した尿サンプル中の同位体比の分析は，水専用の熱分解炉・還元炉を備えたPyrOH-IsoPrime（GV Instruments, UK）同位体比質量

分析計を用いて行った。前のサンプルの影響を取り除くため，分析は，各サンプルにつき9回行い，最大値と最小値を除いた7回の平均値を用いて^{2}Hの減衰率（以下，Kh）を次式で算出した。

$$Kh = [(\delta l - \delta b) - (\delta f - \delta b)] / (t/24)$$

δbはベースライン尿のδ値，tはWTの測定時間(h)，δl，δfはそれぞれ測定開始時間，終了時間の尿のδ値である。

また，次式により体水分量（Total body water：TBW）を算出した。

$$TBW(L) = [(dose \times 99.9/20)(18.01/Ne(APe - APb))]/1.041$$

doseは被験者が服用したD_2Oの重さ（g），99.9は被験者が服用したD_2O中の同位体存在率，20は1molあたりのD_2Oの重さ（g），18.01は1molあたりの水の重さ（g），Neは重水素の自然界存在比である0.015576/100，APeとAPbはそれぞれ平衡時およびベースライン尿の同位体存在率，である。

以上により求めたKh，TBWを用い，1日当たりに入れ替わる水分代謝量であるWT（L/day）を算出した。また，水分代謝量はボディ・サイズにより異なるため[5, 8]，本研究では，体重で除すことにより体重1kg当たりのWTを表したWT/BW（ml/kg/day），先行研究[6]によりTBWがWTと有意な相関を示したことから，TBWの割合で表された% WT（%/day）を算出した。

Ⅲ．結果

1．被験者の身体特性

被験者は体格の類似した被験者A（女性，22歳），被験者B（男性，23歳）とし，身体特性を表2に示した。

2．WTの結果

被験者A，Bの% WTの日内変動および1日毎の変動を図1，2に示した。図1は1日毎の% WTの変化であり，図2は12時間毎（9：00-21：00を昼間とし，21：00-9：00を夜間とした）の% WTの変化を示した。1日毎の% WT（図1）は，被験者A，Bにおいて対照的な変動を示した。被験者Aは，day2，4でWTは高値を示し，被験者Bはday1，3，5に高値を示した。トレーニングはday2，4に行っており，被験者Aは身体活動量が多いほどWTは高値を示している。また，12時間毎の% WTの変化（図2）は，1日毎のWTの変動と同様に，被験者A，Bで全く異なる変動を示した。被験者Aは昼間に高値を示し，夜間には低値を示したが，被験者Bは昼間に低値を示し，夜間に高値であった。また，被験者Aは，トレーニングを行ったday2，4，6の昼間は，トレーニングを行っていないday1，3，5の昼間に比べ，高値を示した。

Table 2. Physical Characteristics of Subjects

	Subject A	Subject B
Sex	Female	Male
Age (yr)	22	23
Height (cm)	169.2	173.8
Body Mass (kg)	66.7	66.8
BMI (kg/m^2)	23.3	22.1

Table 3. Change of % WT (% /day) per day

	Subject A	Subject B
day1	6.8	18.1
day2	11.7	11.2
day3	6.5	13.3
day4	9.3	8.8
day5	6.0	9.4

Table 4. Change of % WT (% /day) per 12 hours

		Subject A	Subject B
day1	daytime	9.9	12.0
	nighttime	3.7	24.1
day2	daytime	19.3	6.4
	nighttime	4.1	16.1
day3	daytime	9.4	7.4
	nighttime	3.5	18.8
day4	daytime	12.2	7.2
	nighttime	6.6	10.3
day5	daytime	9.1	7.6
	nighttime	3.0	11.2
day6	daytime	16.8	8.4

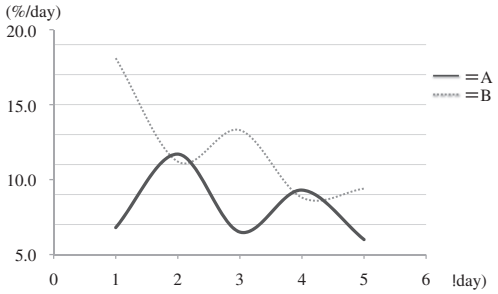

Fig.1. Change of water turnover per day in Subject A and B

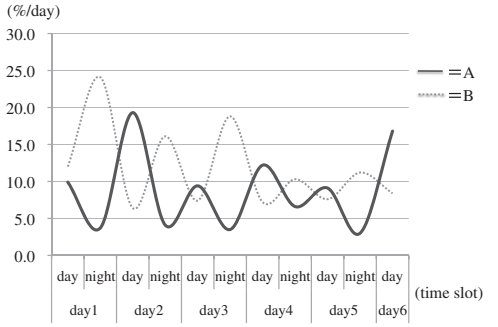

Fig.2. Change of water turnover per 12 hours in Subject A and B

Ⅳ. 考察

先行研究の結果から，身体活動は量，レベルによってWTに影響を及ぼすことが明らかとなっている[7, 9–19]。本研究における被験者AのWTは，全ての測定日において昼間は高値を示し，夜間は昼間と比較して低値を示した。昼間はトレーニング以外においても，日常生活を営む上で活動的になること，夜間は睡眠をとるなど活動的ではなく身体活動量は減少することが推測されることから，身体活動量がWTを反映するという先行研究[7, 9–19]と同様の結果を示していると考えられる。また，トレーニングを行った日（身体活動量が多い日）の昼間は，トレーニングを行わなかった日の昼間よりもWTは明らかに高値を示し，これも先行研究[7, 9–19]と同様に，身体活動量，身体活動レベルがWTに反映されていた結果がみられる。

体水分は主に腎臓により調節されており，体水分量は尿中に排出されることによって調節され，健康人の尿量は夜間に減少するとされている。この変化は夜間に水分の摂取量が低下するためではなく，24時間の間一定間隔で同じ量の水分を摂取した場合でも起こり，また，昼間に睡眠をとっても尿量は減少する[2]。つまり，夜間は水分出納が減少し，WTの値は昼間と比較して低値を示す。このことから，被験者AのWTは，腎臓の日内リズムの面からみてもWTの変化は妥当と考えられる。

一方で，被験者Bについては同様の日内変動は見られず，夜間のWTは昼間に比べて高値を示した。また，被験者AはD_2O投与をした後1時間毎に採尿した際に，D_2Oの平衡状態が見られるまでの時間が約2時間であり，水の区画化が正常な者で平衡は約3時間以内に起こる[22]ことから正常範囲であったが，被験者Bは平衡時間が約6時間と大きく遅延していた。McCulloughら[23]は，腹水をもつ患者の平衡時間を測定し，平衡が投与4時間後まで起こらないことから，平衡の遅延を報告している。また，Danneら[24]は，妊娠女性で平衡までの時間を測定し，妊娠により約1時間程度平衡を遅らせたことを報告した。このように，拡大した細胞外水区画をもつ患者で経口同位体投与後の4時間ないし5時間という平衡時間が報告されているが，被験者Bは腹水などの病的症状をもたず，このような導管化が十分でない区画に過剰な水をもつ被験者である可能性は低いと考えられる。

しかしながら，今回の被験者Bにおける平衡が遅延していることは明らかであり，平衡の遅延と同様に，昼夜のWTの異なる変動は，水分代謝が遅延したことによる可能性が考えられる。また，被験者Bの結果が腎機能の影響によるものとするならばWTの変動全体が低い値を示すはずであるが，被験者Bの1週間の平均の1日のWT（L/day），WT/BW（ml/kg/day），%WT（%/day）は，競技者を対象とした先行研究12，15，17，19）と近い値を示しており，腎機能の低下による遅延の可能性は低いと考えられる。つまり，被験者BはWTの値に異常はないものの，身体活動の反映が遅延しているのではないだろうか。また，被験者Bは，1日毎のWTでも反応が遅延しているような変動を示し，day1を除くday2からday5では，トレーニングを行った日よりもトレーニングを行った次の日，つまり行わなかった日にWT

は高値を示した。以上のことから，被験者A，Bの体水分量，長期的なWTは先行研究[9-15, 17-19, 25]と比較して同様の結果を示したが，本研究の検討課題である日内変動については，被験者AとBは異なる結果であり，被験者Bは腎機能の日内リズム，身体活動の反映の面から考察すると，大きな遅延が起こっていると考えられる。また，この遅延を水分摂取の面から考えると，トレーニング中の水分摂取だけではなく，睡眠前の水分摂取や起床時の水分摂取についても考慮する必要があると考えられる。

本研究の結果より，競技者の水分代謝の日内変動には個人差がある可能性が示された。このことは，水分摂取の際には体重の増減だけではなく，身体活動を反映するタイミングの遅延などの個人差を考慮しなければならない可能性が考えられる。従って，これまでの1週間の平均の1日の水分代謝を評価するmuliti-point 法やtwo-point 法だけではなく，本研究のようにサンプル採取の回数や同位体の分析方法を変えることによって，検討することが必要であろう。

本研究で示された明らかに異なるWTの日内変動は初めて示された結果であったが，被験者2名における水分代謝の日内変動の一例を提示するに留った。また，被験者が体格は近いが男女であったことも含め，今後被験者数を増やし再検討する必要があり，それによって水分摂取基準や水分摂取ガイドラインの作成に重要な課題を示す基礎資料となると考える。

Ⅴ．参考文献

1）Gillian Pocock, Christopher D. Richards：体液量の調節．監訳　岡野栄之，植村慶一，オックスフォード・生理学　原書3版，611–619，丸善株式会社，2009

2）岩瀬善彦，森本武利：生理学とは．血液と体液．生体のリズム．やさしい生理学　改訂第4版，1–7，275–280，南江堂，2000

3）島本英樹，小宮秀一，増田隆：小児の体水分の代謝回転．日本人生理人類学会誌　9：23–28，2004

4）島本英樹，小宮秀一：高齢男性における体水分のturnover. Geriatric Medicine　41：259–263，2003

5）Fusch C, Hungeriand E, Scharrer B et al.：Water turnover of healthy children measured by deuterated water elimination. European Journal of Pediatrics　152：110–114，1993

6）堀内聡，乙木幸道，寺本圭輔　ほか：日本人小児における体水分の代謝回転と齢の関連（2～7歳）．健康支援10（2）：47–55，2008

7）島本英樹，坂元康成，守山敏樹：水同位体希釈法を用いて算出した高齢者の水分出納．大阪大学大学教育実践センター紀要　4：7–11，2007

8）川勝岳夫：水分代謝．小児看護　7：1162–1169，1984

9）Fusch C, Gfrorer W, Koch C et al.：Water turnover and body composition during long-term exposure to high altitude（4,900–7,600m）. Journal of Applied Physiology 80（4）：1118–1125，1996

10）Leiper JB, Pitsiladis Y, Maughan RJ：Comparison of water turnover rates in men undertaking prolonged cycling exercise and sedentary men. international Journal of Sports Medicine 22：181–185，2001

11）Leiper JB, Carnie A, Maughan RJ：Water turnover rates in sedentary and exercising middle aged men. British Journal of Sports Medicine 30：24–26，1996

12）Fusch C, Gfrorer W, Dickhuth H et al.：Physical fitness influences water turnover and body water changes during trekking. Medicine and Science in Sports and Exercise 30：704–708，1998

13）Westerterp KR, Plasqui G, Goris　AHC：Water loss as a function of energy intake, physical activity and season. British Journal of Nutrition 93：199–203，2005

14）Leiper JB, Maughan RJ：Comparison of water turnover rates in young swimmers in training and age-matched non-training

individuals. International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism 14：347–357，2004

15）Hideki Shimamoto, Shuichi Komiya：Comparison of body water turnover in endurance runners and age-matched sedentary men. Journal of Physuological Anthropology and Applied Human Science 22：311–315，2003

16）Westerterp KR, Saris WH, van Es M et al.：Use of the doubly labeled water technique in humans during heavy substained exercise. Journal of Applied Physiology 61：2162–2167，1986

17）Hill　RJ, Davies PSW：Energy expenditure during 2 wk of an ultra-endurance run around Australia. Medicine and Science in Sports and Exercise 33（1）：148–151，2001

18）Lane HW, Gretebeck RJ, Schoeller DA et al.：Comparison of ground-based and space flight energy expenditure and water turnover in middle-aged healthy male US astronauts. The American Journal of Clinical Nutrition 65：4–12，1997

19）Satoshi Horiuchi, Masami Miyazaki, Akira Tsuda et al.：Comparison of Water Turnover Rate between Female Soft Tennis Players and Age-matched Sedentary Individuals during Extensive Summer Training. Journal of the Human-Environmental System 11（2）：123–127，2008

20）堀内聡，千葉正，乙木幸道　ほか：日本人小児の4–6歳の体水分の代謝回転に及ぼす温熱環境の影響．人間と生活環境　16（1）：37–42，2009

21）Speakman JR, Racey PA：Doubly labeled water：errors in the evaluation of oxygen isotope turnover due to temporal variation in CO2 production do not always covary with dilution space estimate. Journal of Theoretical Biology 141：547–556，1989

22）アレックスF・ロッシュ，スティーブンB・ハイムズフィールド，ティモシィG・ローマン：化学的水分法．監訳　小宮秀一　身体組成研究の基礎と応用，42，大修館書店，2001

23）McCullough AJ, Mullen KD, Kalhan SC: Measurements of total body and extracellular water in cirrhotic patients with and without ascites. Hepatology 14：1102–1111，1991

24）Denne SC, Patel D, Kalhan SC：Total body water measurement in normal and diabetic pregnancy：Evidence for maternal and amniotic fluid equilibrium. Biology Neonate 57：284–291，1990

25）Hideki Shimamoto, Shuichi Komiya: The turnover of body water as an indicator of health. Journal of Physiological Anthropology and Applied Human Science 19–5：207–212，2000