浮力分の重錘を荷重した水中歩行時の 呼吸循環反応

—膝蓋骨浸水水位における呼気ガス分析—

*Cardiorespiratory of Underwater Walking with Weight Bearing of Buoyant Force
—Analysis of Expiratory Gas on Patella Immersion Level—*

粂山日出樹¹⁾ 佐竹 将宏¹⁾ 進藤 伸一¹⁾ 阪井 康友²⁾ 玉木 彰³⁾

HIDEKI MOMIYAMA¹⁾, MASAHIRO SATAKE¹⁾, SINICHI SINDO¹⁾, YASUTOMO SAKAI²⁾, AKIRA TAMAKI³⁾

¹⁾Akita University College of Allied Medical Sciences: 1-1-1 Hondo, Akita 010-8543, Japan. TEL +81 18-884-6530
E-mail hidekimo@ams.akita-u.ac.jp

²⁾Department of Physical Therapy, Ibaraki Prefectural University of Health Sciences

³⁾Department of Physical Therapy, Osaka Prefectural University of Health Sciences

Rigakuryoho Kagaku 14(2): 85-89, 1999. Submitted Oct. 23, 1998. Accepted Mar. 20, 1999.

ABSTRACT: The purpose of this study was to examine the effect of the walking in water which removed the buoyant force (buoyant force removal walking: B.F.R.W.) on respiratory and circulatory systems. Ten healthy college students wore a load weight equivalent to their own buoyant force and were ordered to walk in water of the water level of patella. In case of walking of 2.16 km per hour, oxygen uptake during walking in water or B.F.R.W. was significantly ($p<0.01$) greater than that during land walking. No significant changes in O_2 pulse, heart rate and the double product were observed among walking in water, B.F.R.W. and land walking. These results suggest that B.F.R.W. can induce various degrees of exercise intensity in the closing movement chain reaction by changing walking speed and water level, and is applicable to muscle strengthening exercise for lower limbs and to physical endurance strengthening exercise.

Key words: buoyant force removal walking, cardiorespiratory, viscosity

要旨: 10名の健常大学生に対して、水中浮力分の重錘を荷重し、陸上と同様な下肢荷重を与える浮力を除去した歩行の呼吸循環反応について検討した。膝蓋骨浸水水位における時速2.16kmでの歩行において、浮力除去歩行及び水中歩行は、陸上歩行に比べて体重当たり酸素摂取量($\dot{V}O_2/w$)有意に高値を示し($p<0.01$)、浮力除去歩行と水中歩行において $\dot{V}O_2/w$ に有意差を認めなかったことから、浮力分の荷重の有無による影響は認められなかった。また、酸素脈、心拍数、二重積において3歩行様式間に有意な変化は認められず、一回拍出量及び動静脈酸素較差によって $\dot{V}O_2/w$ が補われたことが示唆された。浮力除去歩行は、歩行スピード及び水位を変化させることで閉鎖的運動連鎖状態において水の粘性抵抗を有効に利用し、段階的運動強度の位置づけが可能と考えられた。

キーワード: 浮力除去歩行, 呼吸循環反応, 粘性抵抗

1) 秋田大学医療技術短期大学部理学療法学科: 秋田県秋田市本道 1-1-1 (〒010-8543) TEL 018-884-6530

2) 茨城県立医療大学理学療法学科 3) 大阪府立看護大学医療技術短期大学部理学療法学科

受付日 1998年10月23日 受理日 1999年3月20日

I. 緒 言

近年、水中における運動は、水泳やアクアビックス、浸水下でのトレッドミル歩行などで行われるようになり、健康若年者から高齢者迄を対象とし、特に、下肢関節疾患を呈する疾患など、広く健康維持・増進、及び機能回復を目的に行われている。そのうち、歩行浴は、水中における物理的作用の一つである浮力を利用して関節荷重を調節し、高齢者においては身体運動の労作負担を軽減させ、筋力・持久力増強の獲得などを目的に臨床応用されている。特に、水中トレッドミルを用いた先行研究では、胸骨・剣状突起水位の歩行に対する呼吸循環器系の変化が報告され、水位による身体作業負担の変化が報告¹⁾されている。

しかし、この水中浮力は、対象疾患によって免荷を必要とする者には好条件ではあるが、免荷の期間を終了したものと歩行に関する筋力・持久力を増強させたい場合には、むしろ水中歩行は望ましい条件とはなり得ない。

我々は、水中浮力分の重錘を荷重することで水の粘性抵抗を有効に利用し、かつ陸上と同様な下肢荷重を与える特殊環境下での運動が、筋力や持久力を効果的に増強する事が可能と考える。そこで浮力を除去した水中歩行(以下、浮力除去歩行)が、陸上及び水中歩行と比較して呼吸循環器系に及ぼす影響について基礎的な研究を実施し、若干の知見を得たので報告する。

II. 方 法

対象は、健康な男子大学生10名とし、平均年齢20.8歳、平均身長174.9 cm、平均体重68.4 kgであった。被験者には、測定前に、測定内容に関する十分な説明を行い承諾を得た。

測定に用いた歩行様式は、陸上歩行、水中歩行及び水中浮力を重錘負荷にて相殺した浮力除去歩行の3様式を用いた。

浮力除去歩行時に荷重した重錘の重さは、個々の被験者の浮力を測定して決定した。浮力の測定は、水を浸した浴槽に、被験者の膝蓋骨上縁まで浸水させ溢れ出た水の重さをバネ秤にて計測した。浮力除去歩行には、測定にて得られた重さの重錘を、腰背部及び腹部にマジックバンドを用いて固定し歩行を行った。それぞれ3様式の歩行条件は、時速2.16 kmにて3 mの距離を5分間往復歩行することを条件とし、各歩行の測定を同一日に行わないように実施した。また、水中及び浮力除去歩行は、

水温36度、室温22～24度、湿度50～60%、水深53 cmの環境下において測定を行った。今回設定した水温は、不感温度であり、不感温度帯での運動は、Amelung, W.²⁾によれば、酸素消費量を最小限に抑えると述べており、温熱による身体への影響を最小限にするために、不感温度帯での条件設定を用いた。

各歩行時の呼吸代謝測定機器は、AE-280S(ミナト医科学社製)にて、血圧及び心拍数は、ML4500(フクダ電子社製)により安静時から歩行終了後まで連続して測定を行った。

測定項目は、体重当たりの酸素摂取量(以下 $\dot{V}O_2/W$)、酸素脈($\dot{V}O_2/HR$ 以下 O_2pulse)、心拍数(Heart Rate, 以下HR)、二重積(Double Product, 以下DP)を採用し、各条件ごとに比較検討を行った。 O_2pulse は、一回拍出量から取り出された酸素摂取量で心血管系の機能によって規定され、DPは、酸素摂取量と高い相関を示すことから心機能及び心仕事量の非観血的モニターとして採用した。データの分析は、 $\dot{V}O_2/W$ が定常状態になったのを確認し、歩行後4分時のデータを分析した。また、最大酸素摂取量(peak $\dot{V}O_2$)は、あらかじめ最大下運動負荷試験にて求め、3歩行様式と相対的に比較した。

測定データは、一元配置分散分析を用いて行い危険率5%未満を有意とした。

III. 結 果

各歩行様式における体重当たり酸素摂取量は、陸上歩行で平均 9.04 ± 2.37 ml/kg/min (mean $\pm$ SD, n=10)、水中歩行が平均 12.02 ± 1.31 ml/kg/min、浮力除去歩行が平均 12.57 ± 0.84 ml/kg/minであった。また、相対的な運動強度は、陸上歩行がpeak $\dot{V}O_2$ の約22%、水中及び浮力除去歩行は、約30%に相当した。一方、浮力除去歩行を行う際に使用した重錘の重さは、平均 7.6 ± 1.2 kgであった。

水中及び浮力除去歩行時の酸素摂取量は、陸上に比べ有意($p<0.01$)に増加したが、水中と浮力除去歩行の両条件下では有意な変化は認めなかった。酸素脈においても、水中及び浮力除去歩行が陸上に比べ有意($p<0.01$)に増加し、水中と浮力除去歩行間においては、有意な変化はみられなかった(Fig. 1, 2)。HRとDPは、陸上、水中、浮力除去のそれぞれの条件下で有意な変化を示さなかった(Fig. 3, 4)。

IV. 考 察

我々は、閉鎖的運動連鎖という条件において運動学習

Fig. 1 $\dot{V}O_2/W$ under each walking condition and Peak $\dot{V}O_2/W$
 **: $p < 0.01$, mean $\pm$ SD. Land: land walking, Water: water walking, B.F.R.W: buoyant force removal walking.

Fig. 3 Heart rate under each walking condition
 mean $\pm$ SD. Land: land walking, Water: water walking, B.F.R.W: buoyant force removal walking.

Fig. 2 $\dot{V}O_2/HR$ under each walking condition
 **: $p < 0.01$, mean $\pm$ SD. Land: land walking, Water: water walking, B.F.R.W: buoyant force removal walking.

Fig. 4 Double product under each walking condition
 mean $\pm$ SD. Land: land walking, Water: water walking, B.F.R.W: buoyant force removal walking.

及び筋力・全身持久力増強訓練の必要性を重視している。身体に対して水の粘性抵抗は、ゆっくりした歩行スピードでは、速さに比例し、早い歩行速度では速さの自乗および推進投影面積に比例する³⁾とされている。つまり、筋力が高値のものほど受ける抵抗が増加する。これは、等速性運動機器を用いての筋力増強効果に類似している。このような水の粘性抵抗を最大限に利用し、閉鎖的運動連鎖の環境下において運動するために、立脚期において

のみ陸上と近似した重力環境を設定することが出来る「浮力除去歩行」の運動強度と運動生理学的反応を検討した。

各歩行条件下における運動生理学的反応及び物理的作用

①陸上歩行と水中歩行

水中歩行時における $\dot{V}O_2/W$ は、先行研究に一致して、

陸上歩行と比較し有意に高く、身体作業負担度が高い事が明らかであった。

水中における物理的作用は、温熱作用、静水圧、浮力、粘性抵抗などが挙げられる。

温熱作用及び静水圧作用による循環系への影響は、筆者ら⁴⁾の基礎的研究において、膝蓋骨水位での静止立位時において認められなかった。大転子レベル以上の水位での先行研究では、静脈環流が静水圧により促進され、Frank-Starlingの法則により一回心拍出量が増大することで、HRの増加を伴わないことが報告されている。前述の基礎的研究は、今回と同一の環境下において、静止立位時での循環調節反応を比較したもので、HR、DP、拡張期血圧は、今回の水中歩行時においても同様に統計学的に有意な変化を示さなかった。また、膝蓋骨水位において、浮力は、浮力分の重錘負荷量から算出すると平均約7.6 kgに相当し、体重の約1/10に値した。それに対し、水の粘性抵抗は、中山ら³⁾によると、陸上に比べ28倍の抵抗を受けるとされている。

つまり、水中歩行では、陸上歩行に比較して浮力により個体質量が削減される事によって仕事量は低下するが、それにも増して水の粘性抵抗による仕事量増大により、 $\dot{V}O_2$ が有意に増加したものと考えられる。

②陸上歩行と浮力除去歩行

浮力除去歩行は、浮力分の重錘を負荷することで陸上に近似した重力環境にあると考えられる。また、荷重状態を浮力除去歩行時の歩行様相で分けて分析すると、立脚期においては、陸上と同様の抗重力筋活動と推進力が要求されるが、反対側下肢の遊脚期においては、浮力が生じ、振り出し時に下腿を持ち上げる仕事量が減じられる。このように水中においては、両下肢に生じる浮力を一掃し、陸上と同一の重力環境下に設定することは困難である。

しかし、前述した筆者の基礎的研究から温熱作用及び静水圧作用は、ほとんど陸上と同様に循環系に対して影響を及ぼしていないことから、陸上歩行と浮力除去歩行の酸素摂取量の差は、膝蓋骨浸水レベルでの遊脚期初期に生じる浮力分の仕事量を除いた、水の粘性抵抗による仕事量増大を示唆している。

③水中歩行と浮力除去歩行

水中歩行と浮力除去歩行の仕事量に統計学的有意な差を認めなかったのは以下の理由が考えられた。水中歩行時の立脚期に生じる浮力が体重の10分の1(約7 kg)程度で抗重力筋や自重を推進する際に要する仕事量を軽減

するほどではなかった事によるものと考えられる。つまり、水中歩行が、浮力分の重錘で補正した浮力除去歩行と仕事量に差がなかったことから、膝蓋骨水深レベルでは、浮力の有無が仕事量の増減に影響を及ぼす因子とはならないことが示唆された。むしろ、膝蓋骨レベルの水深では、従来から述べられているように歩行速度による粘性抵抗の増減が、直接酸素摂取量の増減につながると考えられた。

④ O_2 Pulse、HR、DPの関連性

心拍出量は、 $HR \times \text{一回心拍出量 (stroke volume, 以下SV)} = \dot{V}O_2 / \text{動脈静脈血酸素較差 (A-V } O_2 \text{ difference, 以下A-V } O_2 \text{ diff)}$ で示され、 O_2 Pulseは、 $\dot{V}O_2 / HR = SV \times A-V O_2 \text{ diff}$ でも表される。A-V O_2 diffは、運動筋における酸素利用、摂取能力及び血流分配に依存しているが、トレーニングをしていない健常者では最大約3倍まで増加しうる。また、運動強度の増加に伴い健常者のHRは、ほぼ直線的に増加するが、SVは、軽度～中等度の負荷で最大となり、それ以上強い運動では不変ないしやや減少する傾向があるとされている。これにより、心拍出量は運動強度の増加とともに直線的に増加するがこれに対するHRとSVの増加の割合は運動強度により異なる⁵⁾といわれている。今回、陸上歩行に比較して、水中歩行及び浮力除去歩行時の O_2 Pulseが有意に増加したのは、HR及びDPが陸上と比較して不変であったことをふまえると、SVとA-V O_2 diffの増加によって生じていたことが推察できる。つまり、静水圧による静脈環流量増加に伴ったSVの増加ではなく、水中の粘性抵抗による仕事量増大に対してSVとA-V O_2 diffの増加によって運動筋に酸素供給されていたことが示唆される。

今回試みた浮力除去歩行は、立脚下肢において抗重力筋活動を伴い下腿に受ける水中の粘性抵抗に抗して身体を推進している。今回の歩行スピードは、安楽で低速度だったことから、水中歩行に比して、浮力除去歩行の段階的運動強度の位置づけにまで至らなかった。しかし、浮力除去歩行時の立脚下肢筋の抗重力活動を伴った浮力除去歩行は、閉鎖的運動様式で筋力及び全身持久力を有効に増強可能なトレーニングと考える。

今後は、膝蓋骨浸水レベルにおける浮力除去歩行時の歩行スピードや、水位レベルを変えて浮力除去歩行の有効性について明らかにしたいと考える。

まとめ

1. 浮力除去歩行(浮力分の重錘を負荷した水中歩行)が

身体の呼吸循環器系に及ぼす影響について検討を行った。

2. 今回設定した歩行速度と膝蓋骨レベルの水深においては、水中及び浮力除去歩行ともに $\dot{V}O_2/W$ に有意な変化を示さず、浮力の影響が少ないことが示唆された。
3. 水中及び浮力除去歩行は、水深と歩行スピード組み合わせることで段階的な運動強度の設定が可能であり、有効な下肢筋力増強訓練、全身持久力増強訓練として有効利用することが可能と考えられた。

引用文献

- 1) 堀田 昇・他：水中及び陸上歩行時の呼吸循環応答．体力科学, 42: 653, 1993.
- 2) Amelung, W, Hildebrandt, G: Balneologie and medizinische Klimatologie. Band 2 Balneologie 61 ~ 78, Springer-Verlag, Berlin, 1985.
- 3) 中山彰一：骨・関節疾患の水中訓練, 理学療法, 4(4): 279-285, 1987.
- 4) 山日出樹・他：水深の違いが静止立位時の循環系に及ぼす影響．秋田大学医療技術短期大学部紀要, 6(2): 175-178, 1998.
- 5) 谷口興一：心肺運動負荷テスト—呼気ガス分析による心肺疾患の新しい見方—．南江堂, 東京, 1993, pp225-227.