

総説：水中運動時の生理応答

清水 富弘*・上田 毅**

(平成10年4月30日受理)

要 旨

本研究は、水中運動におけるヒトの生理諸応答を検討した。その結果の概要は、以下の通りである。

水中での運動に対する応答の大部分は、質的には陸上運動に対するものと同じだが量的な違いがあり、水中でのレクリエーション、治療、リハビリテーション・プログラムの処方にはこの違いが重要となる。空気中とは異なる浮力、粘性、熱伝導性といった水の特性が、水中での最大下の有酸素性エネルギー消費量に影響し、運動様式、運動強度、水深、水温といった条件によって、陸上で同じ運動をした時より消費量は多かったり、同じだったり、少なかったりする。

水中での運動で最大酸素摂取量を測定すると、陸上で傾斜をつけたトレッドミル上のランニングで測定した値より少ないことが多い。これは、水中では、最大心拍数が低いためであり、活動する筋量が少ないことや、作業筋のトレーニング度が低いことも関与する可能性がある。水中での最大下の運動による血中乳酸濃度は、同じような運動を同等の強度で陸上で行なった場合と比べて低い、等しい、高いと研究結果はわかれている。最大運動では、水中の方が血中乳酸濃度は低い。浸水することで心臓への静脈還流は増加し、運動に対する循環器系の応答も陸上での運動と異なる。垂直姿勢での最大下の運動では、陸上での同じ酸素摂取量が得られる強度の運動と比べて一回拍出量と心拍出量が多く、高強度で比較すると心拍数は低い。心拍数と酸素摂取量の関係は、運動様式、運動強度、水深、水温によって異なり、同じ酸素摂取量に対する心拍数は低いことが多いため、心拍数を基準にした運動強度の処方、調節には注意が必要となる。水中では、水の静水圧の作用で、肺容量が変化するが、最大下の運動に対する換気応答は、基本的には陸上での運動と同じである。最大換気量は、最大酸素摂取量の減少と比例して低下する可能性がある。

交感神経-副腎の作用、水分調節ホルモンの応答は、水中で垂直姿勢での運動中には抑制される。これは、血液が胸廓に集まるためである。交感神経系の活動低下と血中エピネフリン量の減少が、水中での強度の高い最大下の運動、最大運動で心拍数と血中乳酸濃度が陸上より低くなる理由だと推察される。

水は熱を伝える性質が強く、比熱も高いため、伝導、対流によって、身体から熱が奪われたり、身体が温められたりといった作用が起りやすい。水温によって運動中の深部体温は上昇する、変動しない、低下する場合がある。これには被験者の体脂肪量に関連すると考えられる。

KEY WORDS

Physiological Responses 生理応答, Water Exercise 水中運動

* 生活・健康系教育講座

** 福岡県立大学

1. 緒 言

陸上での運動における身体応答はこれまで数多くの検討がなされ、運動生理学の教科書にも詳述されている (Åstrand と Rodahl1986, McArdle ら1991, Wilmore と Costill1994)。しかし水には独特の性質があるため、水中での運動は陸上でのそれと異なる身体応答が生じる。これまでの水中での運動に関する研究は、水泳についてのものが多く、水泳以外の運動についての情報は少ない (Cureton1997, Frangolias と Rhode1996, Wilder と Breunan1997)。一方、リハビリテーションや治療における水泳以外の水中運動の需要も高まってきている。したがって、本稿では、主に水泳以外の水中運動時の生理応答について陸上での運動との違いに重点をおいて考察する。

2. 方 法

水中運動に対する生理応答に関する研究文献について、インターネットを介し国内外の医学文献データベースから文献リストを収集した(第1次情報)。それをもとに上越教育大学図書館を通じて研究文献を収集した(第2次情報)。さらに第2次収集から得た文献の参考文献から水中運動の生理応答に関する文献を収集した(第3次情報)。

3. 水中での運動における生理応答の特徴

直立姿勢で水に浸かったとき、循環器系に注目すると、血液は下肢(末梢)から腹部、胸部(体幹)に移動する。この血液の移動により体幹の静脈圧は上昇し、左心室の終末拡張期量、一回拍出量(SV)、心拍出量(CO)は増加し、全身循環抵抗は減少するという変化が、安静でも、最大下の運動でも生じる (Aborelius ら1972, Shilling ら1976, Bonde-Petersen ら1980, Sheldahl ら1984, 黒川1984, Sheldahl ら1987, Christie ら1990)。収縮期血圧と拡張期血圧は変動するが、駆出分数でみた収縮性はほぼ等しい(藤本1996, 小野寺ら1996)。安静時や低強度の運動では、心拍数(HR)は陸上での運動とほぼ等しいことが多いが、高強度の最大下運動や最大運動では、陸上での運動より低い<Fig.1>。この理由は明らかでないが、高強度の運動では、HRを増大させる交感神経の心臓への作用が低下する (Rowell1986) と考えるのが合理的だと思われる。すなわち、高強度の運動における交換神経系の働きの低下は、高位の脳中枢、作業筋、圧受容器からの神経刺激が減少するためではないかとみられる (Rowell1980, Mitchell1985)。循環器系の圧受容器が交換神経系の活動に及ぼす作用は明らかでないが、前述の交感神経系の作用の低下は作業筋の化学受容器の代謝活性を低下させると考えられる。

呼吸器系については、静水圧により胸郭が内側に、横隔膜が上方に動き、血液が四肢から胸部、腹部に集まるため、肺の体積は縮小し、肺活量、全肺気量が約5~10%減少し、機能的残気量は約1l(60~70%)減少する。肺の体積の減少により気動抵抗が増加する (Agostoni ら1966, vonDobeln と Holmer1974, Farhi と Linnarsson1977)。こうした変化にも拘わらず、安静時換

気量 ($\dot{V}E$)、一回換気量、呼吸数 (F) は変化しない (Craig と Dvorak 1969, Sheldahl ら 1987)。

内分泌系は首までの浸水で変化し (Epstein ら 1975, Norsk ら 1986, Epstein ら 1987)、交感神経-副腎の水分調節ホルモンの作用は陸上での仰向け姿勢の運動に近いとみられる。Perreault ら (1989) は、仰向け姿勢の自転車エルゴメーター作業の血漿動脈ナトリウム利尿性ペプチドの濃度は、直立姿勢より高く、エピネフリン、ノルエピネフリン、バソプレッシン、レニン、アルドステロン濃度は低かったと報告した。Connelly ら (1990) は、最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_2 \text{ max}$) の 80% と 100% の水中運動の血漿ノルエピネフリン濃度が、陸上での同一運動様式より低く、100% $\dot{V}O_2 \text{ max}$ では血漿エピネフリン濃度も低かったと報告した (Fig. 2)。高強度の運動においてのみ、血漿カテコラミン濃度が低くなる理由は明らかではないが、体幹部の血液量の増加と SV の増加によって圧受容器が刺激される結果、交感神経系の活動が低下する可能性が考えられる。こうした変化は、エネルギー代謝、循環器、腎臓の機能にまで影響する可能性がある。

水温の影響は、陸上での運動では深部体温は $\dot{V}O_2 \text{ max}$ の相対値 (% $\dot{V}O_2 \text{ max}$) に比例して上昇するが、気温 5°C から 30~35°C の間では、気温の影響は受けにくい (Sawka と Wenger 1988, 勝田 1993)。原理的には、水中での運動でも同様であるが、水は熱伝導率が空気の 25 倍、比熱が 1,000 倍であるため、外部温度の影響を受けない温度幅は非常に狭く、水温が皮膚温より高ければ、身体は熱を受け取りやすく、水温が皮膚温より低いと、簡単に熱が奪われることになる (Costill ら 1967, Craig 1968, Holmer と Bergh 1974, Nadel ら 1974)。Costill ら (1967) は、水温 17°C, 27°C, 33°C で、酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$) 約 3.0 l/分 に相当する高強度の水泳を 20 分間行なった。その結果、皮膚温は水に入ると急速に低下して水温との差が $\pm 2^\circ\text{C}$ 以内となり、直腸温は水温に比例して上昇した (0.2~0.6°C)。Nadel ら (1974) は、男性を対象に、水温を変えた回流水槽内で (18°C, 26°C, 34°C) 20 分間、2 種類の泳速の平泳ぎを実施した。その結果、遅い泳速 (0.5 m/秒) の食道温は、水温 18°C, 26°C で低下し、34°C で上昇している。しかも、水温 18°C, 26°C での食道温の低下は体脂肪量に反比例していた。速い泳速では、全ての被験者で水温 26°C, 34°C の深部体温が上昇したが、水温 18°C では、

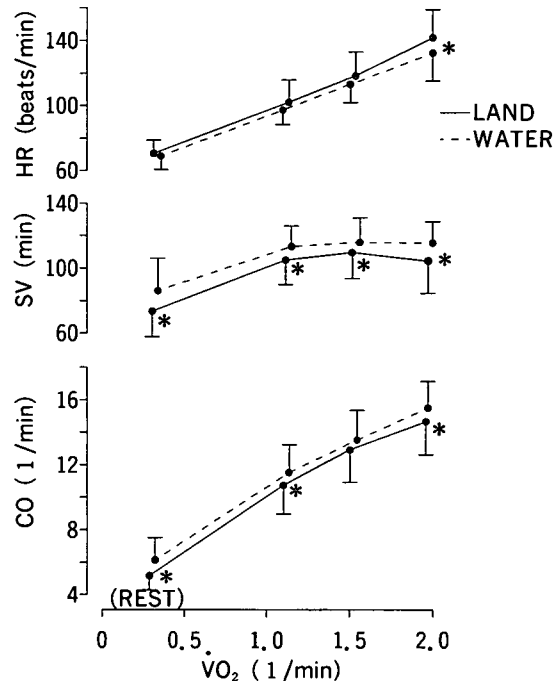
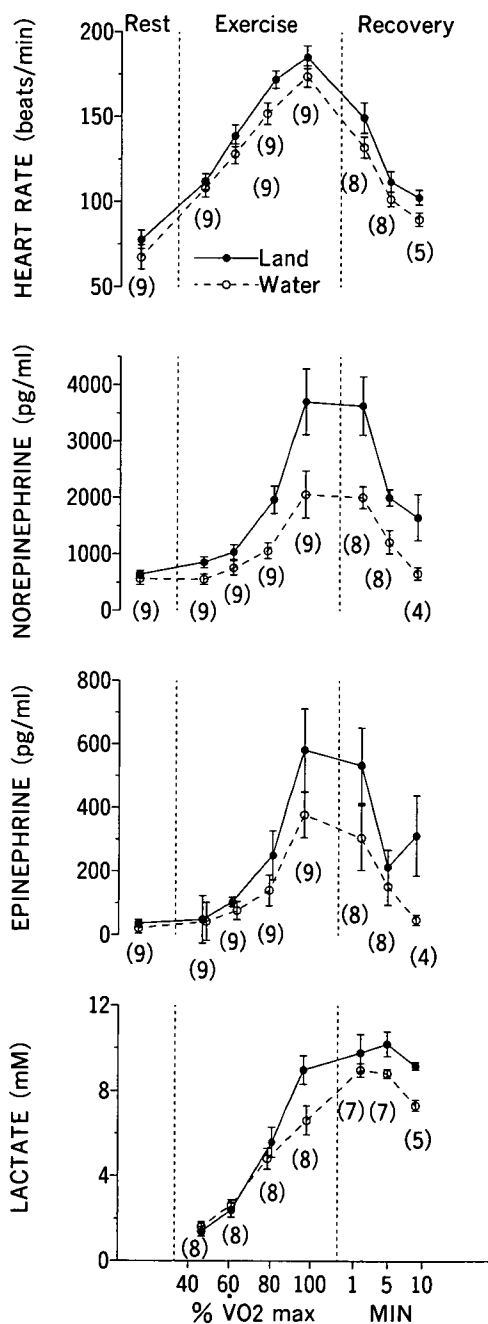


Figure 1. Relation of heart rate (HR), stroke volume (SV), and cardiac output (CO) to oxygen uptake ($\dot{V}O_2$) during cycling of progressively increasing intensity on land and immersed to the neck in water. (Sheldahl LM, Tristani FE, Clifford PS, et al. Effect of head-out water immersion on cardiorespiratory response to dynamic exercise. *J Am Coll Cardiol.* 1987; 10: 1254-1258.)

体脂肪量の多い人で上昇し、体脂肪の少ない人で低下した。 $\dot{V}o_2$ は、水温18℃、26℃で震え(Shivering)によって増加した。Shldahlら(1982)は、肥満女性を対象に、40% $\dot{V}o_2max$ の自転車エルゴメーター作業を90分間実施させた。その結果、直腸温は水温20℃、24℃、28℃で変化しなかった。一方、体脂肪量の少ない女性の直腸温は、水温20℃、24℃で大きく低下したが、28℃では変化しなかった。体脂肪量の少ない女性では、水温20℃、24℃の $\dot{V}o_2$ が震えによって増加した。McArdleら(1984a, 1984b, 1992)は、16名の男性と女性を対象に、水温20℃と28℃で三種類の運動強度(レベルI:700 mlO₂/分, レベルII:1250 mlO₂/分, レベルIII:1700 mlO₂/分)の腕と脚のエルゴメーター作業を60分間実施させた。その結果、直腸温は水温20℃と28℃のレベルIの運動強度を除いて男性で低下したが、女性では変化しないか上昇した。ただし、体脂肪率のほぼ等しい男性と女性を比較すると、女性の直腸温の低下は水温20℃のレベルIの運動強度で男性より大きかった。一方、体脂肪量の少ない女性の直腸温は、水温20℃、24℃で大きく低下したが、28℃では変化しなかった。すなわち、体脂肪による熱の遮断と運動による産熱の相殺効果は性別によって異なる。このように水温の変化に対する体温調節は、安静時には性別、浸水時間、体脂肪量に応じて、水温が約34~28℃を下回ると震えによって機能する。最大下の運動では、これらに運動強度と運動の継続時間の条件が加わり、水温が約26℃を下回るとエネルギー消費量が増加し(Costillら1967, Craig1968, HolmerとBergh1974, Nadelら1974), その増加分は深部体温が37℃を下回った温度幅に比例する。水

Figure 2. Relation of heart rate and plasma norepinephrine, epinephrine, and lactate to % $\dot{V}o_2$ max during cycling at progressively increasing intensities on land and immersed to the neck in water, (Connelly TP, Sheldahl LM, Tristani FE, et al. Effect of increased blood volume with water immersion on plasma catecholamines during exercise. *J Appl Physiol.* 1990; 69: 651-656.)



温18°Cと33°Cでは、水温の違いはその差が $\dot{V}O_2$ で0.5 l/分を越えるという報告もある<Fig. 3>。

水温のホルモン応答への影響について、大柿ら(1995)は、遠泳を想定した低強度(42-50% $\dot{V}O_{2max}$)での120分の水泳を水温23°C, 28°C, 33°Cで実施した。その結果、寒冷下の長時間の水泳は $\dot{V}O_2$ の増加、体温の低下およびそれにとまなう震えを引き起こし、運動30分からの血しょうアドレナリン、ドーパミンおよび血中乳酸濃度の上昇と運動60分以降からの成長ホルモンの上昇をもたらした。

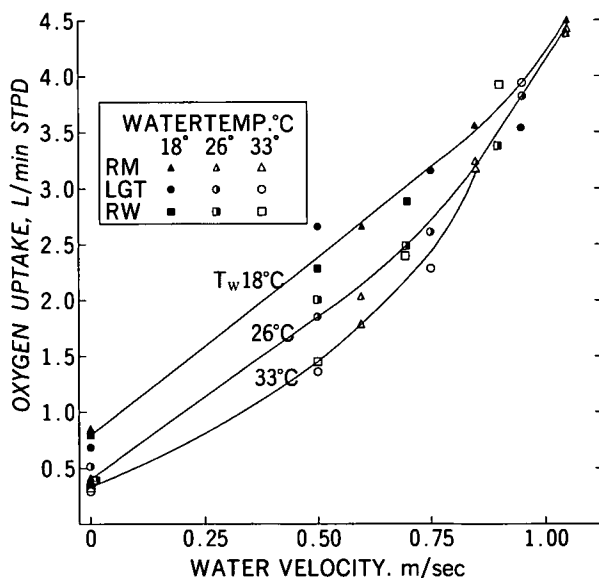
生理応答以外に特筆すべき水の特徴として、水中では浮力が働く(小野寺ら1992, 1993, 1998, Onoderaら1994)。浮力は体重の影響を低減させる。したがって、陸上では、歩行、ジョギング、エアロビック・ダンスなど体重を支持する運動は体重がエネルギー消費に大きく影響するが、水中では重力に抗って身体を動かすためのエネルギーは少なくなる。

また、水中では水の高い粘性と抵抗がある(小野寺ら1992, 1993, 1998, Onoderaら1994)。前述のように水中では浮力によって体重を移動させるためのエネルギーは陸上のそれより小さくなる。反面、水の抵抗に抗って動くためのエネルギーは陸上のそれより大きくなる。特に、身体の大きさ、形状、姿勢や運動の速度は抵抗に強く関与する(Clarys1979)。

4. 各種運動様式における生理応答

水泳も含めた身体運動における運動強度の指標には、 $\dot{V}O_2$ が用いられる。そして、これの最大値の $\dot{V}O_{2max}$ は、呼吸循環器系の能力を示す値として使用される(Taylorら1955, Mitchellら1958)。他の指標には、METs(安静時代謝に対する比率)があり、METsで表わされた数値に安静時代謝を乗ると、最大下、最大の運動中の消費エネルギー量が算出できる。運動強度は、 $\dot{V}O_2$, % $\dot{V}O_{2max}$ またはMETsで表記した。

Figure 3. Oxygen uptake of three subjects during swimming at different velocities in water of different temperatures. Oxygen uptake during submaximal swimming is elevated because of shivering in cool and cold water. (Nadel ER, Holmer I, Bergh U, et al. Energy exchanges of swimming man. *J Appl Physiol.* 1974; 36: 465-471.)



1) 自転車エルゴメーター

水中での腕や脚による自転車エルゴメーター作業中の $\dot{V}O_2$ を測定した研究は散見される。自転車エルゴメーター作業は、負荷強度を段階的に変えることができ、水の粘性により増す $\dot{V}O_2$ を算出するために役立つ。脚だけ、または腕と脚の両方の自転車エルゴメーター作業では、水中でも、陸上でも、 $\dot{V}O_2$ や主観的運動強度 (Ratings of Perceived Exertion: RPE) は作業量に比例して増加する (Craig と Dvorak 1969, Costill 1971, McArdle ら 1976, 三井ら 1982, Robertson ら 1995, 1996, 小野寺ら 1997)。ただし、水温の影響は大きい。Costill (1971) は、水温 25°C の水中で、仰向けで頭を出した姿勢で毎分 50 回転での自転車エルゴメーター作業のエネルギーは、気温 24°C の陸上で、直立または仰向けの姿勢での自転車エルゴメーター作業より 33~42% 多かったと報告した。これは水中では抵抗が大きいためであるが、Craig と Dvorak (1969) は、腕と脚の両方の自転車エルゴメーター作業における毎分 30 回転での最大下強度の $\dot{V}O_2$ は、水温 30°C, 35°C と陸上で差がなかったが、水温 25°C では陸上より大きかった。水温 30°C, 35°C で差

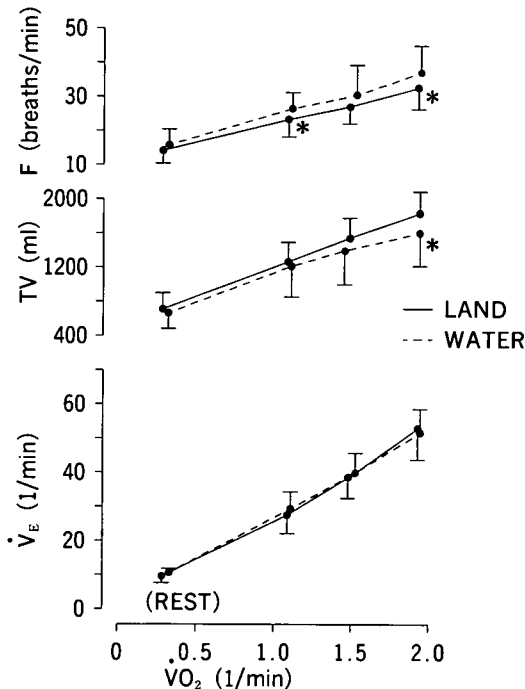


Figure 4. Relation of respiratory rate (F), tidal volume (TV), and ventilation (\dot{V}_E) to oxygen uptake ($\dot{V}O_2$) during cycling of progressively increasing intensities on land and immersed to the neck in water, (Sheldahl LM, Tristani FE, Clifford PS, et al. Effect of head-out water immersion on cardiorespiratory response to dynamic exercise. *J Am Coll Cardiol.* 1987; 10: 1254-1258.)

がなかったのは、回転数が少なかったためと考えられた。水中での自転車エルゴメーター作業がリハビリテーションや治療の目的で使われることはまずないだろうが、こうした研究結果は、水中で体重のかからない運動中、 $\dot{V}O_2$ が大きくなるのは、動作速度の増加による水の粘性抵抗の増加であることを示す。

水温の影響がなければ、 $\dot{V}O_{2max}$ は水に入ることによって変化しない。水から頭を出した直立姿勢の自転車エルゴメーター作業の $\dot{V}O_{2max}$ は陸上でのそれと等しい (Sheldahl ら 1984, Christie ら 1990)。水中での最大下運動で生じる前負荷 (終末収縮量) や CO の増加は、最大運動までは続かないし、その影響は動静脈較差の低下によって相殺される。換気応答は陸上と水中の両方でほぼ等しく (Craig と Dvorak 1969, McArdle ら 1976, Sheldahl ら 1984, 1987) <Fig.4>, 水温 18~33°C なら水温の影響もほとんどない (Craig と Dvorak 1969, McArdle ら 1976, Costill ら 1967, Moore ら 1970)。

40~80% $\dot{V}O_{2max}$ の最大下の自転車エルゴメーター作業では、血中乳酸濃度は水中と陸上で差はないが (Connelly ら 1990) <Fig.2>, 最大運動では水中の方が陸上より低い。血中乳酸濃度と並行して増

加する血漿エピネフリンは、糖新生を刺激することが知られているが、血中のエピネフリンが減少すれば、水中での最大自転車エルゴメータでのグリコーゲンの分解と解糖が減ることになる可能性がある。

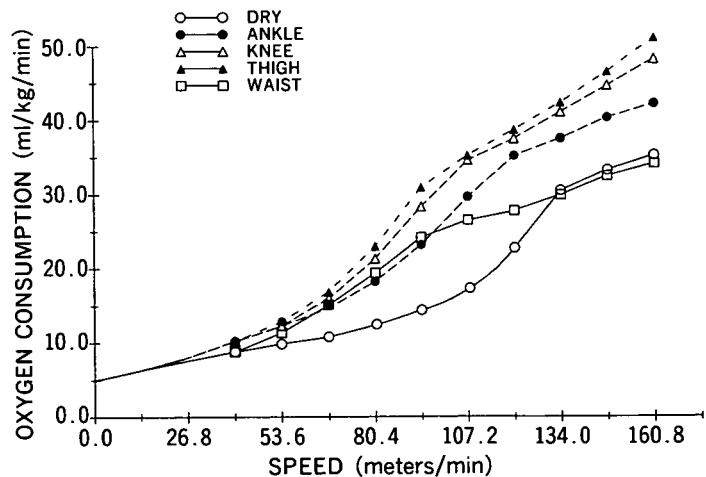
深部体温が低下する水温での $\dot{V}O_{2max}$ や作業量は、自転車エルゴメーター作業では最高で5%低くなる (Daviesら1975, Pirnayら1977, BerghとEkblom1979)。これは最大心拍数 (HRmax) の減少の原因となる可能性がある。動静脈酸素較差の最大値も減少する可能性があるが、体温の低下による酸素とヘモグロビンの解離曲線がずれるためではないかとみられる (BerghとEkblom1979) が測定はされていない。

2) 水中歩行と水中ランニング

プールの底に足が接する状態で行われる水中歩行やランニングは、水泳以外の有酸素運動として広まってきた。そして、リハビリテーションや治療の一環として、一般的なコンディショニングの一部として活用され、特に下肢にけがをした人にとっては有用であると考えられている。前述のように、水中では体重による負荷は軽減するが、動作に抵抗が加わるため、双方の差がエネルギー代謝に与える影響は予測しにくい。したがって、水中歩行やランニングの運動強度には多くの関心が集まっている (WilderとBrennan1993)。特に、呼吸循環器系機能や身体作業能力の改善に結びつく運動強度の算定法はそうである (American College of Sports Medicine1990)。

浅い水深での水中ランニングの $\dot{V}O_{2max}$ は陸上より低い。トレーニングを積んだランナーでは、約90% $\dot{V}O_{2max}$ である (Krahenbuhlら1977, Buttsら1991a, 1977b, Svedenhagと Seger1992)。水中でのランニングは、HRmax や血中乳酸濃度も低く、疲労困憊時の作業量は水中で低い。Evansら (1978) は、ウエストの深さの水中 (31℃) での歩行 (二段階の速度) とランニング (三段階の速度) の $\dot{V}O_2$ を測定している。その結果、 $\dot{V}O_2$ は速度にほぼ比例して増加することが明らかになった。しかも、どの速度でも $\dot{V}O_2$ は、陸上でのトレッドミル走よりより大きかった。ウエストの水深で実施する歩行やランニングのエネルギー消費量は、陸上での速度 (3.4~8.3マイル/時間) の40~50% (1.6~3.5マイル/時間) で等しい。また最も速い

Figure 5. Oxygen consumption (uptake) during walking and jogging on a treadmill at different speeds in air (dry) and in water of different depths. (Gleim GW, Nicholas JA. Metabolic costs and heart rate responses to treadmill walking in water at different depths and temperatures. *Am J Sports Med.* 1989; 17: 248-252.)



ランニングの $\dot{V}o_2$ は約3.0 l/分になりため、水中でのランニングでも、かなりの運動強度になると考えられる。このように、腰部の水深でのプールにおける水中歩行やランニングでは、体重負荷の減少より動作への抵抗の方が、消費エネルギー量に大きな影響を与える。

Gleim と Nicholas (1989) は、水中トレッドミルを用いて、陸上でのトレッドミル歩行と水深と速度を変えた水中歩行を比較した。その結果、2~4.5マイル/時間の水中歩行の $\dot{V}o_2$ は、足首までの水深で25~55%、膝までで26~67%、大腿までで34~72%、ウエストの深さで14~67%増加した<Fig.5>。また、ここまでの速度では、水中と陸上の両方で $\dot{V}o_2$ は速度の増加にしたがって指数関数的に増加する。速度が5マイル/時間以上になると、足首、膝、大腿の水深でのランニングでは、 $\dot{V}o_2$ は陸上のそれより多いが、その増加幅は、低速度の時より小さくなり(それぞれ20~24%、35~37%、40~45%)、ウエストの水深では、速度が5マイル/時間以上で陸上でのランニングの $\dot{V}o_2$ と差がなくなる。このように、ウエストの水深では、浮力と抵抗の影響は相殺され、 $\dot{V}o_2$ は陸上のトレッドミルランニングと等しかった。ただし、ウエストの水深でのプールにおけるランニング (Evansら1978) と比較すると、水中トレッドミルランニングの $\dot{V}o_2$ は非常に低い。

堀田ら (1994, 1995), 右田ら (1994, 1996), 清水ら (1996, 1997), Shimizuら (1998) は、水中のトレッドミルと水流発生装置が組み合わせた流水トレーニング装置 (以下、「フローミル」) を用いて水中歩行と陸上でのトレッドミル歩行を比較した。その結果、スピードの増加に対する $\dot{V}o_2$ とHRは水中と陸上の両方で指数関数的に増大した。特に、水中での歩行スピードと流速を等しくした歩行 (通常のプールでの歩行と類似した形態) の $\dot{V}o_2$ とHRは、陸上でのそれらの約50%であった。フローミルを用いた長時間 (60分間) の同一強度 (50% $\dot{V}o_2$ max) による水中と陸上での歩行の比較 (右田ら1996, 堀田1998) では、HRは水中歩行で低かった。拡張期血圧は水中と陸上でほぼ等しかったが、収縮期血圧が水中歩行で低かったため、心筋の酸素消費量の指標のRate Pressure Productは水中歩行で低かった。運動中のノルアドレナリン上昇率も水中歩行で低かった。このように同一の物理的運動強度の水中歩行の生体負担度は陸上での歩行より低く、運動療法としての水中歩行の有用性は高いと考えられる。

小野寺ら (1992, 1993), Onoderaら (1998) は、一連の研究でフローミルの水にカルボキシメチルセルロース (のり) を溶かすことによって浮力を変えることなく粘性だけを変化させた。その結果、粘性条件のHRや $\dot{V}o_2$ は陸上や真水条件より高く、陸上と真水条件のHRと $\dot{V}o_2$ はほぼ等しかった。このように水の粘性抵抗の違いはHRや $\dot{V}o_2$ に強く影響し、真水条件でみると浮力で軽減された負荷と水の抵抗 (前へ進むときに生じる) がエネルギー消費量とほぼ等しい。また、4km/時間の速度の歩行では、真水の水位を大転子 (腰部) に設定すれば水中と陸上でエネルギー消費量はほぼ等しくなる。

3) 深水ランニング (Deep Water Running: DWR)

DWRは、プールの底に足が接することのない状態のランニングのことで頭が水から出るように浮力をつける浮き具 (ベストかベルト) を着けて実際のランニングを模倣する。

Gehringら (1992) は、ベスト着用のDWR, 着用しないDWR, および陸上でのランニングのエネルギー消費量を、女性競技ランナー, 非競技ランナーで比較した。その結果、競技ランナーでは、3つの条件で消費エネルギーは等しかったが、非競技者では、ベスト着用のDWRも、着用しないDWRも、トレッドミルランニングよりエネルギー消費量が少なく、ベスト着

用のDWRは着用しないDWRより低かった。

DWRにおける最大下の任意の $\dot{V}o_2$ に対するHRは、トレッドミルランニングより低く(Krahenbuhlら1977, Buttsら1991a, 1991b, SvedenhagとSeger1992), 高い強度でも同様の関係が認められ、 $\dot{V}o_{2max}$ とHRmaxは、それぞれトレッドミルの73.5~89%と89~95%である(Buttsら1991a, 1991b, TownとBradley1991, SvedenhagとSeger1992)。

水深の違いによる比較では、DWRの $\dot{V}o_{2max}$ は陸上のトレッドミルでの最大ランニング後の約81%であった(TownとBradley1991)。これは、体重がかからないことにより作業筋量が減少した結果だと考えられる。いずれにしても $\dot{V}o_{2max}$ は水中で低い。ただし、DWRの運動強度には技能水準も影響する。Yamajiら(1990)は、補助なしのDWRでは、 $\dot{V}o_2$ に対するHRの有意な個人間変動を示した。集団としての結果では、DWRとトレッドミルランニングの両方で同様のHRと $\dot{V}o_2$ の関係を示したが、より高い技術を持った2名の被験者では、DWRのHRはトレッドミルランニングより低かった。

DWRとトレッドミルランニングで血中乳酸濃度を比較した研究はいくつか認められる。そのうちの一つ(SvedenhagとSeger1992)では、トレーニングを積んだランナー4人が同等の $\dot{V}o_2$ でのDWRとトレッドミルランニングを4分間行なった。その結果、任意の $\dot{V}o_2$ や $\% \dot{V}o_{2max}$ に対する血中乳酸濃度は、陸上のトレッドミルランニングがDWRより高かった。DWRの血中乳酸濃度が高いのは、作業筋への血流量の減少、筋線維の興奮パターンの変化、腕の動きの増加および陸上でのランニングに比較して運動に慣れていない点が推察される<Table 1>。

Frangoliasら(1994)は、換気性閾値に対する相対的な運動強度が等しい42分間のDWRとトレッドミルランニングを実施した。その結果、最初の14分間の血中乳酸濃度の応答は等しかったが、21~42分では水中の血中乳酸濃度の低下(25%)が陸上(21%)より大きかった。これは水中ランニングが血液への乳酸の流入が少ないか、血液からの除去が速いかのいずれかを示す。

DWRにおけるRPEや、RPEとエネルギー代謝、呼吸循環器系応答との関連について、Brownら(1996b)は、ベスト着用のDWR中のRPEと $\dot{V}o_2$ の密接な関係を示し、同一脚速度では、DWR中のRPEは陸上でのトレッドミルランニングより高かった(Brownら1996a)。Melton-Rogeら(1996)は、最大強度のベスト着用のDWRのRPEが自転車エルゴメーター作業より高かった。Bishopら(1989)は、ベスト着用のDWRとトレッドミルランニングを比較した。その結果、RPEは両方の運動様式で等しかった(11~12)が、平均 $\dot{V}o_2$ とHRは、DWR($\dot{V}o_2$: 1.97 l/分, HR: 122拍/分)が陸上のそれらより低かった($\dot{V}o_2$: 2.68 l/分, HR: 157拍/分)。RitchieとHopkins(1991)は、トレーニングを積んだランナーを対象に、30分間の「きつい」ペースでの浮き具を使わないDWRと、トレッドミルランニングのエネルギー消費量を比較した。その結果、DWRの体重当たりの平均 $\dot{V}o_2$ は49 ml/kg・分でトレッドミルランニングは53 ml/kg・分であった。このように、任意のRPEに対するエネルギー消費量は、水の抵抗力によりトレッドミルランニングより低いですが、運動強度は $\dot{V}o_{2max}$ の改善に十分な運動強度であると考えられる。ただし、DWRの運動強度は動きのリズムに応じて増加する(Wilderら1993)ので、リズムとエネルギー消費量、その他の指標(HR, RPE)の関係が明らかになれば、DWRの運動強度を個々に処方する手段が得られることになる。

Table 1. Maximal Physiologic Responses (Mean [Standard Deviation]) to Deep Water Running (DWR)

Physiologic Measure	Study					
	Butts et al., 1991a	Butts et al., 1991b (females)	Butts et al., 1991b (males)	Svegenhag and Seger, 1992	Town and Bradley, 1991	Navia, 1986
$\dot{V}O_{2max}$ TM (liters/min)	3.0(0.3)	3.321(0.317)	4.550(0.368)	4.60(0.14)	—	—
$\dot{V}O_{2max}$ DWR (liters/min)	2.6(0.5)	2.786(0.367)	4.086(0.405)	4.03(0.13)	—	—
$\dot{V}O_{2max}$ TM (ml/kg/min)	54.7(7.0)	55.7(4.8)	64.5(2.8)	—	—	58
$\dot{V}O_{2max}$ DWR (ml/kg/min)	46.8(9.1)	46.8(5.9)	58.4(3.9)	—	—	48
$\dot{V}O_{2max}$ DWR/TM (%)	86	84	89	87.8(2.4)	73.50	83
HR max TM (bpm)	197.9(9.4)	188.7(9.3)	193.3(5.8)	188(2)	—	197
HR max DWR (bpm)	180.3(6.0)	179.5(7.5)	183.4(5.9)	172(3)	—	175
HR DWR/TM (%)	91	95	95	91	90	89
RER TM	1.05(0.03)	1.13(0.03)	1.15(0.04)	1.2(0.3)	—	—
RER DWR	1.01(0.08)	1.09(0.04)	1.11(0.03)	1.1(0.4)	—	0.95
RPE TM	19.1(0.3)	—	—	—	—	19.2
RPE DWR	19.3(0.6)	—	—	—	—	19.1
Lactate TM (mmol/liter)	—	—	—	10.0(0.16)	—	—
Lactate DWR (mmol/liter)	—	—	—	12.4(1.3)	—	—
Lactate DWR/TM (%)	—	—	—	124	81	—
O ₂ pulse max TM (ml O ₂ /beat)	—	—	—	24.5	—	—
O ₂ pulse max DWR (ml O ₂ /beat)	—	—	—	23.4	—	—
O ₂ pulse max DWR/TM	—	—	—	0.096	—	—
Ventilation TM (liters/min)	—	111.6(7.0)	150.0(11.6)	—	—	—
Ventilation DWR (liters/min)	—	97.7(10.9)	140.8(17.8)	—	—	—

HR=heart rate; RER=respiratory exchange ratio; RPE=ratings of perceived exertion; TM=treadmill.

SOURCE: Wilder RP, Brennan DK. Physiological responses to deep water running in athletes. Sports Med. 1993; 16: 374-380.

4) その他の水中運動における身体応答

水中でのエアロビクスや体操の $\dot{V}O_2$ について、Kirbyら(1984)はプールでの歩行(胸の水深)、ランニング(胸の水深)、パドルを使った水平位の外転と内転(あごの水深)、腕を振りながらのその場ランニング(肩の水深)のエネルギー消費量を測定した。水温はいずれも36°Cで、上記の運動のエネルギー量は、それぞれ2, 6, 4.5, 7METsに相当したと報告した。Johnsonら(1977)は、男女各4人を対象に、水中と陸上の両方で、立位の腕運動(肩の外転-内転、屈曲-伸展)と脚運動(屈曲-伸展)を行った。その結果、水中での体重当たりの $\dot{V}O_2$ は、陸上より高かった。脚運動のエネルギー消費量は、水中で7~10METsで、陸上で6~8METs、腕運動は、水中で3~4METs、陸上で2.5~3METsであった。CassadayとNielsen(1992)は、腕と脚の体操を水中と陸上の両方で行なったときのエネルギー消費量を比較した。その結果、両腕の外転-内転、股関節の屈曲-伸展動作のエネルギー消費量は、水中が陸上より大きく、上肢の運動では、水中で3~6METs、陸上で2~3.5METs、下肢の運動は、水中で4~9

METs, 陸上で4~6.5METsであった。また水中と陸上の両方でエネルギー消費量は動きのリズムに比例して増加した。

水中でのエアロビクスや体操以外では、Bufalinoら(1992)は42インチの水深での踏み台昇降の $\dot{V}O_2$ が陸上より17~22%少ないと報告した。このときのHRやRPEも低く、重力に抗うのみの体肢の運動では、 $\dot{V}O_2$ に対する浮力の影響は大きい。また水中における直立姿勢の運動では、水深もHRに関係する。これは、水深によって、運動に必要なエネルギー量と体幹部に集まる血液量が異なるためである。水中エアロビクスのHRは、胸までの水深がウエストまでより8~11拍/分少ない(Kennedyら1989)。

Vickeryら(1983)は、健康・スポーツについてアメリカ大統領諮問委員会が推奨する3種類の水中運動(20分間のロー・ギアのプログラム, 30分間のミドル・ギアのプログラム, 60分間のハイ・ギアのプログラム)について報告した。3種類の水中運動とも水中でのエクササイズと水泳を組合せたものであったが、平均 $\dot{V}O_2$ は1.2~1.3 l/分, 51~57% $\dot{V}O_{2max}$ に相当した。

このように、水中での各種運動は、運動不足で、なおかつ身体作業能力の低い人をターゲットにした治療、リハビリテーション、レクリエーションなどの運動プログラムにおいて、中強度の運動が必要な場合に有用であると考えられる。

5. ま と め

水中での運動における身体応答は、質的には陸上での運動とほぼ等しいが、量的な違いが認められた。水中では、空気中と比べて、浮力が働き、粘性が大きい。また熱の伝導率が高いなどの水の性質が、最大下の有酸素性エネルギー消費量に影響し、同じ運動様式を実施したときでも、運動強度、水深、水温などの条件によって、エネルギー消費量は変動する。実際、水中での運動で $\dot{V}O_{2max}$ を測定すると、陸上でのトレッドミルランニングの値より低いことが多い。これは、水中でのHRmaxが低いこと、作業筋量が少ないこと、作業筋におけるトレーニングの程度が低いことなどが関与する可能性がある。

水の静水圧の作用により肺容量は変化するが、最大下の運動に対する換気応答は、基本的には陸上での運動と等しい。また最大換気量($\dot{V}E_{max}$)は、 $\dot{V}O_{2max}$ の低下に比例して低くなる可能性がある。

交感神経-副腎の作用や水分調節ホルモンの応答は、水中で垂直姿勢での運動中には抑制される。これは、血液が胸廓に集まるためであり、交感神経系の活動低下と血中エピネフリン量の減少が、水中での高強度の最大下および最大運動で、HRや血中乳酸濃度が陸上より低い理由だと考えられた。

水は熱を伝える性質が強く、比熱も高いため、伝導、対流によって、身体から熱が奪われたり、身体が温められたりといった作用が起こりやすく、運動中の深部体温も水温に大きく影響を受ける。

最大運動の血中乳酸濃度は水中が陸上より低い。最大下運動では、同一運動様式、同等の運動強度(絶対強度、または相対強度)の陸上での運動を実施したとしても、得られる結果は同じでない。身体が水に入ることで心臓への静脈還流が増加し、運動に対する循環器系の応答

も陸上とは異なる。水中での垂直姿勢による最大下運動のSVやCOは、陸上でのそれらより高く、高強度ではHRが低い。 $\dot{V}O_2$ とHRの関係は、運動様式、運動強度、水深、水温によって異なる。水中では、同一 $\dot{V}O_2$ に対するHRは低いことが多いため、HRによる運動強度の処方や調節には注意が必要となる。

このように、水中での治療、リハビリテーション、レクリエーションなどの運動プログラムの処方には、これらの違いを考慮する必要があると考えられた。

引用文献

- Aborelius M, Balldin UI, Lilja B, et al. Hemodynamic changes in man during immersion with the head above water. *Aerospace Medicine*. 1972; 43: 592-598.
- Agostoni E, Gurtner G, Torri G, et al. Respiratory mechanics during submersion and negative pressure breathing. *J Appl Physiol*. 1966; 21: 251-258.
- American College of Sports Medicine. Position stand on the recommended quantity and quality of exercise for developing and maintaining cardiorespiratory and muscular fitness in adults. *Med Sci Sports Exerc*. 1990; 22: 265-274.
- Åstrand PO, Rodahl K. *Textbook of work physiology*. New York, McGraw-Hill; 1986.
- Bergh U, Ekblom B. Physical performance and peak aerobic power at different body temperatures. *J Appl Physiol*. 1979; 46: 885-889.
- Bishop PA, Frazier S, Smith J, et al. Physiologic responses to treadmill and water running. *Physician Sportsmedicine* 1989; 17: 87-94.
- Bonde-Petersen G, Christensen NJ, Henriksen O, et al. Aspects of cardiovascular adaptation to gravitational stresses. *Physiologist*. 1980; 23: S7-S10.
- Brown SP, Chitwood LF, Beason KR, McLemore DR. Perceptual responses to deep water running and treadmill exercise. *Perceptual and Motor Skills*. 1996a; 83: 131-139.
- Brown SP, Chitwood LF, Beason KR, McLemore DR. Physiological correlates with perceived exertion during deep water running. *Perceptual and Motor Skills*. 1996b; 83: 155-162.
- Bufalino KD, Moore AF, Sloniger EL, et al. Physiological and perceptual responses to bench stepping in water and on land. *Med Sci Sports Exerc*. 1992; 24: S183.
- Butts NK, Tucker M, Smith R. Maximal responses to treadmill and deep water running in high school female cross country runners. *Res Q Exerc Sport*. 1991a; 62: 236-239.
- Butts NK, Tucher M, Greening C. Physiologic responses to maximal treadmill and deep water running in men and women. *Am J Sports Med*. 1991b; 19: 612-614.
- Cassady SL, Nielsen DH. Cardiorespiratory responses of healthy subjects to calisthenics performed on land versus in water. *Phys Ther*. 1992; 72: 532-538.
- Christie JL, Sheldahl LM, Tristani FE, et al. Cardiovascular regulation during head-out water immersion exercise. *J Appl Physiol*. 1990; 69: 657-654.
- Clarys JP. Human morphology and hydrodynamics. In: Terauds. J, Bedingfield EW, eds. *Swimming*. Baltimore, University Park Press; 1979:3-41.
- Connelly TP, Sheldahl LM, Tristani FE, et al. Effect of increased central blood volume with

- water immersion on plasma catecholamines during exercise. *J Appl Physiol.* 1990; 69: 651-656.
- Costill DL, Cahill PJ, Eddy D. Metabolic responses to submaximal exercise in three water temperatures. *J Appl Physiol.* 1967; 22: 628-632.
- Costill DL, Energy requirements during exercise in the water. *J Sports Med Phys Fitness.* 1971; 11: 87-92.
- Craig AB, Dvorak M. Thermal regulation of man exercising during water immersion. *J Appl Physiol.* 1968; 25: 28-35.
- Craig AB, Dvorak M. Comparison of exercise in air and in water of different temperatures. *Med Sci Sports.* 1969; 1: 124-130.
- Cureton KJ. Physiologic responses to water exercise. Ruoti RG, Morris DM, Cole AJ. (eds.) *Aquatic rehabilitation*, Lippincott: Philadelphia. 1997; 39-56.
- Davies M, Ekblom B, Bergh U, et al. The effects of hypothermia on submaximal and maximal work performance. *Acta Physiol Scand.* 1975; 95: 201-202.
- Epstein M, Pins DS, Sancho J, et al. Suppression of plasma renin and plasma aldosterone during water immersion in normal man. *J Clin Endocrinol Metab.* 1975; 41: 618-625.
- Epstein M, Loutzenhiser R, Friedland E, et al. Relationship of increased plasma atrial natriuretic factor and renal sodium handling during immersion-induced central hypervolemia in normal humans. *J Clin Invest.* 1987; 79: 738-745.
- Evans BW, Cureton KJ, Purvis JW. Metabolic and circulatory responses to walking and jogging in water. *Res Q.* 1978; 49: 442-449.
- Farhi LE, Linnarsson D. Cardiopulmonary readjustments during graded immersion in water at 35 degrees C. *Respir Physiol.* 1977; 30: 35-50.
- Frangolias DD, Rhodes EC, Belcastro AN. Comparison of metabolic responses to prolonged work at tvent during treadmill and water immersion running. *Med Sci Sports Exerc.* 1994; 26: S10.
- Frangolias DD, Rhode EC. Metabolic responses and mechanisms during water immersion running and exercise. 1996; 22: 35-53.
- 藤本繁夫. 心拍数と血圧に及ぼす水圧の影響. *デサントスポーツ科学*17. 1996; 34-40.
- Gehring M, Keller B, Brehm B. Physiological responses to deep water running in competitive and non-competitive runners. *Med Sci Sports Exerc.* 1992; 24: S23.
- Gleim GW, Nicholas JA. Metabolic costs and heart rate responses to treadmill walking in water at different depths and temperatures, *Am J Sports Med.* 1989; 17: 248-252.
- Holmer I, Bergh U. Metabolic and thermal response to swimming in water at varying temperatures. *J Appl Physiol.* 1974; 37: 702-705.
- 堀田昇, 大柿哲朗, 金谷庄藏, 藤島和孝, 萩原博嗣. 高齢低体力者に対する水中での運動療法. *デサントスポーツ科学*15. 1994; 78-83.
- 堀田昇, 大柿哲朗, 金谷庄藏, 藤島和孝. 新しい水中運動装置 (flowmill) を用いた運動療法. *体力研究*42. 1995; 11-17.
- 堀田昇. 水中歩行ー陸上歩行と比較してー. *バイオメカニクス研究*2-1. 1998; 48-52.
- Johnson BL, Stromme SB, Adamczyk JW, et al. Comparison of oxygen uptake and heart rate during exercises on land and in water. *Phys Ther.* 1977; 57: 273-278.

- 勝田茂編著. 運動生理学20講. 朝倉書店, 東京, 1993; 50-60.
- Kennedy CA, Foster VL, Socker JM, et al. The influence of water depth and music tempo on heart rate response to aqua aerobics. In: Proceedings of the International Symposium on the Scientific and Medical Aspects of Aerobic Dance Exercise. 1989; 96-104.
- Kirby L, Sacamano JT, Balch DE, et al. Oxygen consumption during exercise in a heated pool. *Arch Phys Med Rehabil.* 1984; 65: 21-23.
- Krahenbuhl GS, Pangrazi RP, Burkett LN, et al. Field estimation of V_{O2}max in children eight years of age. *Med Sci Sports.* 1977; 9: 37-40.
- 黒川隆志. 水中運動の循環反応. *体育の科学*34, 1984; 510-517.
- McArdle WD, Magel JR, Lesmes GR, et al. Metabolic and cardiovascular adjustment to work in air and water at 18, 25 and 33 degrees C. *J Appl Physiol.* 1976; 40: 85-90.
- McArdle WD, Magel JR, Gergley TJ, Spina RJ, Toner MM. Thermal adjustment to cold water exposure in resting men and women. *J Appl Physiol.* 1984a; 56: 1565-1571.
- McArdle WD, Magel JR, Spina RJ, Gergley TJ, Toner MM. Thermal adjustment to cold water exposure in exercising men and women. *J Appl Physiol.* 1984b; 56: 1572-1577.
- McArdle WD, Katch FI, Katch VL. *Exercise physiology, energy, nutrition and human performance.* Philadelphia, Lea & Febiger; 1991.
- McArdle WD, Toner MM, Magel JR, Spina RJ, Pandolf KB. Thermal responses of men and women during cold-water immersion: influence of exercise intensity. *Eur. J. Appl. Physiol.* 1992; 65: 265-270.
- Melton-Rogers S, Hunter G, Walter G, Harrison P. Cardiorespiratory responses of patients with rheumatoid arthritis during bicycle riding and running in water, *Physical Therapy.* 1996; 76: 1058-1065.
- 右田孝志, 村岡康博, 堀田昇, 大柿哲朗, 金谷庄藏, 藤島和孝. 水中および陸上歩行時の呼吸循環器の応答. 久留米大学保健体育センター研究紀要2. 1994; 25-30.
- 右田孝志, 堀田昇, 大柿哲朗, 金谷庄藏, 藤島和孝, 吉水浩, 増田卓二. 中等度強度・長時間の水中歩行中のホルモンおよび代謝応答—陸上歩行との比較—. *健康科学*18. 1996; 51-56.
- Mitchell JH, Sproule BJ, Chapman CB. The physiological meaning of the maximal oxygen intake test. *J Clin Invest.* 1958; 37: 538-547.
- Mitchell JH. Cardiovascular control during exercise: central and reflex neural mechanisms. *Am J Cardiol.* 1985; 55: 34D-41D.
- 三井淳蔵, 穂丸武臣, 山崎良比古, 宮下充正. 水中における安静時および運動時の体温変化—小児の場合—. *体力科学*31. 1982; 178-188.
- Moore TO, Bernauer EM, Seto G, et al. Effect of immersion at different water temperatures on graded exercise performance in man. *Aerospace Medicine.* 1970; 41: 1404-1408.
- Nadel ER, Holmer I, Bergh U, et al. Energy exchanges of swimming man. *J Appl Physiol.* 1974; 36: 465-471.
- Norsk P, Bonde-Petersen F, Warberg J. Arginine vasopressin, circulation, and kidney during graded water immersion in humans. *J Appl Physiol.* 1986; 61: 565-574.
- 大柿哲郎, 堀田昇, 金谷庄藏, 藤島和孝, 清水富弘, 正野知基. 3種類の水温度下での低強度長時間水泳に対するホルモンおよび代謝応答. *体育学研究*40. 1995; 80-88.
- 小野寺昇, 木村一彦, 宮地元彦, 米谷正造, 原英喜. 水の粘性抵抗が水中トレッドミル歩行中の

- 心拍数と酸素摂取量に及ぼす影響. 宇宙航空環境医学29. 1992; 67-72.
- 小野寺昇, 宮地元彦, 矢野博巳, 木村一彦, 中村由美子, 池田章. 水の粘性抵抗と水温が水中トレッドミル歩行中の酸素摂取量および直腸温に及ぼす影響. 川崎医療福祉学会誌3. 1993; 167-174.
- Onodera S, Miyachi M, Yano H, Nakamura Y, Kimura K. Effect of differences in buoyancy of water on oxygen uptake and heart rate during swimming. *Med Sport Sci.* 1994; 39: 126-130.
- 小野寺昇, 宮地元彦, 矢野博巳. 血圧からみた高齢者の水中プログラムの安全性と妥当性. テサントスポーツ科学17. 1996; 53-61.
- 小野寺昇, 山元健太, 西村正広, 宮地元彦. 新型水中エルゴメーターを用いた運動負荷時の心拍数と酸素摂取量の変化. 川崎医療福祉学会誌7. 1997; 205-209.
- 小野寺昇, 宮地元彦, 矢野博巳, 宮川健. 水の物理的特性と水中運動. バイオメカニクス研究2. 1998; 33-38.
- Perrault H, Cantin M, Thirault G, et al. Plasma atrial natriuretic peptide during brief upright and supine exercise in humans. *J Appl Physiol.* 1989; 66: 2159-2167.
- Pirnay F, Deroanne R, Petit JM. Influence of water temperature on thermal, circulatory and respiratory responses to muscular work. *Eur J Appl Physiol.* 1977; 37: 129-136.
- Ritchie SE, Hopkins WG. The intensity of exercise in deep-water running. *Int J Sports Med.* 1991; 12: 27-29.
- Robertson R, Goss F, Michael T, et al. Metabolic and perceptual responses during arm and leg ergometry in water and air. *Med. Sci. Sports Exerc.* 1995; 27: 760-764.
- Robertson R, Goss F, Michael T, et al. Validity of the Borg perceived exertion scale for use in semirecumbent ergometry during immersion in water. *Perceptual and Motor Skills.* 1996; 83: 3-13.
- Rowell LB. What signals govern the cardiovascular responses to exercise?. *Med Sci Sports Exerc.* 1980; 12: 307-315.
- Rowell LB. Human circulation: regulation during physical stress. New York, Oxford University Press; 1986.
- Sawka MN, Wenger CB. Physiological responses to acute exercise-heat stress. In: Pandolf KB, Sawka MN, Gonzalez RR, eds. Human performance physiology and environmental medicine at terrestrial extremes. Indianapolis, Benchmark; 1988: 97-151.
- Sheldahl LM, Buskirk ER, Loomis JL, et al. Effects of exercise in cool water on body weight loss. *Int J Obes.* 1982; 6: 29-42.
- Sheldahl LM, Wann LS, Clifford PS, et al. Effect of central hypervolemia on cardiac performance during exercise. *J Appl Physiol.* 1984; 57: 1662-1667.
- Sheldahl LM, Tristani FE, Clifford PS, et al. Effect of head-out water immersion on response to exercise training. *J Appl Physiol.* 1986; 60: 1878-1881.
- Sheldahl LM, Tristani FE, Clifford PS, et al. Effect of head-out water immersion on cardiorespiratory response to dynamic exercise. *J Am Coll Cardiol.* 1987; 10: 1254-1258.
- Shilling CW, Werts MF, Schandelmeier eds.: The underwater handbook., Plenum Press: New York and London; 1976; 135-150.
- 清水富弘, 藤島和孝, 大柿哲朗, 堀田昇. 水中歩行時の体温および主観的温度感覚に及ぼす水温

- の影響. 上越教育大学研究紀要第16-1. 1996; 1-14.
- 清水富弘, 藤島和孝, 大柿哲朗, 堀田昇. 水中歩行時の換気循環反応および主観的運動強度に及ぼす水温の影響. 上越教育大学研究紀要第16-2. 1997; 667-677.
- Shimizu T, Kosaka M, Fujishima K. Thermoregulatory responses during prolonged walking in water at 25°C, 30°C and 35°C. *Eur J Appl Physiol* .1998; in press.
- Svedenhag J, Seger J. Running on land and in water: comparative exercise physiology. *Med Sci Sports Exerc*. 1992; 24: 1155-1160.
- Taylor HL, Buskirk E, Henschel A. Maximal oxygen uptake as an objective measure of cardiorespiratory performance. *J Appl Physiol*. 1955; 8: 73-80.
- Town GP, Bradley SS. Maximal metabolic responses of deep and shallow water running in trained runners. *Med Sci Sports Exerc*. 1991; 23: 238-241.
- Vickery SR, Cureton KJ, Langstaff JL. Heart rate and energy expenditure during aqua dynamics. *Physician Sportsmedicine* 1983; 11: 67-72.
- von Döbeln W, Holmér I. Body composition, sinking force, and oxygen uptake of man treading water. *J Appl Physiol*. 1974; 37: 55-59.
- Wilder RP, Brennan DK. Physiological responses to deep water running in athletes. *Sports Med*. 1993; 16: 374-380.
- Wilder RP, Brennan D, Schotte DE. A standard measure for exercise prescription for aqua running. *Am J sports Med*. 1993; 21: 45-48.
- Wilder RP, Brennan DK. Techniques of aqua running, Becker BE and Cole AJ (eds.) *Comprehensive aquatic therapy*. Butterworth-Heinemann: Boston: 1997; 123-134 .
- Wilmore JH, Costill DL. *Physiology of sport and Exercise*. Champaign, Ill: Human Kinetics; 1994.
- Yamaji K, Greenley M, Northey DR, et al. Oxygen uptake and heart rate responses to treadmill and water running. *Canadian Journal of Applied Sports Science*. 1990; 15: 96-98.

A Review: Physiological Responses to Water Exercise

Tomihiro SHIMIZU*, Takeshi UEDA**

ABSTRACT

The purpose of this study was to investigate the physiological responses against water exercise through bibliographies. The major results are summarized as follows :

Although most responses to exercise in water are qualitatively similar to those resulting from exercise performed on land, important quantitative differences exist that may affect exercise prescription for water recreational, therapeutic, and rehabilitative activity programs. The buoyant force, greater viscosity and increased heat conductivity of water compared to air usually alter aerobic energy expenditure during submaximal exercise in water so that it may be greater, the same, or less than during the same activity performed on land, depending on the exercise mode, exercise intensity, water depth and water temperature at which the exercise is carried out. $\dot{V}O_{2\max}$ is often lower in many forms of water exercise than during uphill treadmill running on land because of lower maximal heart rate, and perhaps decreased working muscle mass and state of training of the muscles involved. Blood lactate accumulation during submaximal exercise in water may be less, the same, or greater than during comparable exercise on land at the same absolute or relative intensity. During maximal exercise, blood lactate accumulation is less during water exercise. The hydrostatic pressure of water immersion increases venous return to the heart and alters the cardiovascular response to exercise. During submaximal upright exercise, stroke volume and cardiac output are greater, and, at higher intensities, heart rate is lower than during exercise on land at the same $\dot{V}O_2$. The relation of heart rate to $\dot{V}O_2$ is variable and depends on the exercise mode, exercise intensity, water depth and temperature. The heart rate at a certain $\dot{V}O_2$ is often lower during water exercise, so caution must be used in using heart rate to prescribe and regulate the intensity of water exercise. Although lung volumes are altered by the increased hydrostatic pressure of water, the ventilatory response to submaximal exercise is essentially the same as during exercise on land. Maximal ventilation may be reduced in proportion to the reduction in $\dot{V}O_2$ max. Evaporation of sweat does not occur in water, and the higher heat conductivity and specific heat of water cause heat to be gained and lost more readily from the body through conduction and convection. Depending on water temperature, core body temperature may increase, stay the same, or decrease. Sympathoadrenal and fluid-regulating hormone responses are suppressed during upright exercise in the water

-
- * Division of Physical Education, Home Economics and Technology Education :
Department of Health and Physical Education
 - * * Fukuoka Prefectural University

because of redistribution of the blood volume to the thorax. Reduced sympathetic nervous system activity and blood epinephrine levels may account for the lower heart rate and blood lactate accumulation during strenuous submaximal and maximal exercise.