

近位大動脈拍動緩衝機能に対する水中運動の効果

国立研究開発法人
産業技術総合研究所 菅原 順

Effects of Aquatic Physical Activity on Proximal Aortic Function in Middle-aged and Elderly Adults

by

Jun Sugawara

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

ABSTRACT

Aquatic exercise is ideal for older adults because it mitigates weight-bearing stress. However, the effect of aquatic exercise on central arterial properties (e.g., proximal arterial stiffness and aortic blood pressure [BP]), strong determinants of future cardiovascular disease, remains unclear. We determined if aquatic exercise would decrease arterial stiffness and central blood pressure. To do so, we performed two experiments: firstly, we compared central arterial properties of lifelong Japanese pearl divers (Ama) with age-matched adults living in the same fishing villages (Study-1). Secondly, we determine the effect of regular aquatic exercise on central arterial properties in middle-aged and older adults (Study-2). In Study-1, we recruited 115 female pearl divers (mean age: 65 ± 11 yr) as well as age-matched 50 physically inactive and 33 physically active female non-divers living in the same fishing villages in rural locations. Pulse wave velocity from the heart to the brachial artery (hbPWV; partly reflecting proximal aortic stiffness) and between the brachium and the ankle (baPWV; reflecting stiffness of abdominal aorta and leg arteries) were measured. No significant group differences were found in either brachial blood pressure or baPWV

among the groups. hbPWV was 5% lower in physically active adults and 9% lower in Ama compared with their sedentary peers ($P < 0.05$). There were no significant differences in central blood pressure among groups. In Study-2, central arterial properties were evaluated in twelve normotensives middle-aged and older peoples (mean age = 66 ± 9 yrs) before and after the supervised aquatic exercise program (90 min, 1 day/week, 3 months) which consisted of walking, stretching, and muscle strengthening in water. Following the training intervention, brachial and aortic systolic blood pressure and baPWV significantly decreased, whereas no significant change was seen in hbPWV. These results demonstrate that regular aquatic exercise, even at a low frequency, could mitigate cardiovascular disease risk in normotensive middle-aged and older people. The inconsistency of results between Study-1 and Study-2 might be attributed to the duration of experience (e.g. lifelong vs. 3 months).

要 旨

本研究では、近位大動脈拍動緩衝機能に着目し、習慣的な水中運動の実施が動脈ステイフネスおよび大動脈血圧に与える影響を明らかにすることを目的とした。まず、動脈ステイフネスの適応における部位特性を検証するため、水中運動以外の有酸素性運動を習慣的に行っている中高年女性と同年代の海女（合計 198 名）とで、動脈ステイフネスを比較した。その結果、海女の近位大動脈ステイフネス指標が、同年代の運動習慣のない女性よりも有意に低値であることが明らかとなった。一方、腹部大動脈を主体とする動脈ステイフネス指標に有意差は認められなかった。次いで、健常な中高齢者 12 名を対象に、有酸素性運動を主体とする 3 か月間の水中運動教室の前後で、動脈ステイフネスおよび大動脈血圧を計測した。トレーニング後、中高齢者の近位大動脈ステイフネス指標に有意な変化は認められなかったが、上腕および大動脈収縮期血圧と baPWV に有意な低下が認められた。以上の結果は、低頻度かつ短期間の水中運動実施は、近位大動脈の機能的適応を生じえないものの、心血管系疾患の発症リスクである大動脈血

圧や動脈ステイフネスを改善できる可能性を示唆する。

緒 言

近位大動脈は高い伸展性を有し、断続的な心臓からの血液駆出によって生じる血流・血圧変動というメカニカルストレスを緩和する作用（拍動緩衝機能）を有し、脳のような脆弱な末梢臓器をメカニカルストレスから保護している¹⁾。この機能は、加齢に伴う動脈壁硬化度（ステイフネス）の増大により低下し、脳血管疾患や認知症の発症原因となる²⁾。一方、高強度インターバルトレーニングにより拍動緩衝機能が改善されることも報告されている³⁾が、そのような運動を後期高齢者や有患者に付加することは、現実的には難しい。

中等強度の有酸素性運動を習慣的に行うことで、加齢に伴う動脈ステイフネスの増大を抑制・改善されることが明らかとなっている⁴⁾。これに関連し、申請者らは、長年素潜り漁を続けている女性（海女）の動脈ステイフネスが、同地区に住む同年代の運動習慣を有さない女性よりも低いことを明らかにした⁵⁾。海女は素潜り漁の際にダイナミックな四肢の運動をほとんど行わない。それ

ゆえ、動脈ステイフネスが低かった機序としては、水圧による静脈還流の増大が、有酸素性運動と同じような一回拍出量の増大、およびシヤストレスの増大をもたらし、動脈の構造・機能に好影響を与えた可能性が考えられる。これらの知見を合わせて考えると、水中での歩行運動は、有酸素性運動に水圧の影響が付加されるため、比較的低強度でも運動中の一回拍出量増加を増強でき、近位大動脈の拍動緩衝機能に対して高いトレーニング効果を有するのではないかと推察される。そこで本研究では、この仮説を検証するために、まず、水中運動以外の有酸素性運動を習慣的に行っている中高年女性と同年代の海女とで動脈ステイフネスおよび大動脈血圧を比較した(研究1)。次いで、水中運動を用いたトレーニング介入が、中高齢者の動脈ステイフネスおよび大動脈血圧に対する影響を検証した(研究2)。

1. 研究方法

1. 1 対象

研究1(横断研究)では、三重県志摩市および鳥羽市、千葉県南房総市に住む海女115名(海女群)、および海女でない同年代の女性83名を対象とした。海女でない女性については、自治体が実施している健康づくり運動教室の参加者(活動群)とそうでない者(非活動群)に分けた。

研究2では、自治体が主催する水中運動教室に参加した健康な中高齢者12名(平均年齢 66 ± 9 歳、うち男性5名)を対象とした。水中運動指導の専門家の下、水中歩行、水中ジョギング、水を利用した抵抗性運動、ストレッチング等で構成された水中運動トレーニングプログラム(ウォーミングアップを含め90分程度)に週1回、3か月間行い、その期間の前後で循環機能指標を計測した。12名のうちの4名は過去に、同様の水中運動教室への参加経験があったが、本実験実施前の4か月間は、水中運動を実施していなかった。

本実験は、国立研究開発法人 産業技術総合研究所 人間工学実験委員会の承認(人2013-461, 2017-759)を得て行った。実験の詳細を被験者に口頭および文書で説明し、実験参加の同意を得た後、実験を行った。

1. 2 実験プロトコルおよび測定項目

前日および当日の激しい身体活動、前日および当日のアルコール摂取、測定前3時間以内の飲食を避けてもらうよう指示した。身長および体重を計測後、十分な安静をとった後、仰臥位姿勢にて、血管機能検査装置(VaSera, フクダ電子社製[実験1]、およびform PWV/ABI, コーリンメディカルテクノロジー社製[実験2])を使用し、心拍数、血圧、動脈脈波伝播速度を計測した。動脈脈波伝播速度は動脈壁の硬さ(動脈ステイフネス)の指標であり、この値が低いほど拍動緩衝機能は高いと考えられる。本研究では、一般的に用いられている上腕-足首間動脈脈波伝播速度(brachial-ankle pulse wave velocity, baPWV)に加え、心臓-上腕動脈間動脈脈波伝播速度(heart-brachial pulse wave velocity, hbPWV)を計測した⁶⁾(図1)。前者では、容積圧脈波センサを内蔵した血圧計測用カフを上腕と足首に巻き、脈波の伝播時間差を計

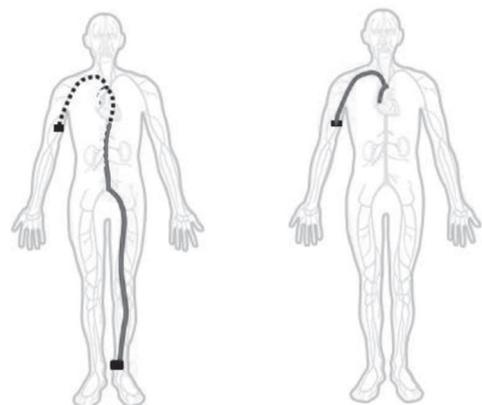


図1 Arterial paths evaluated by brachial-ankle pulse wave velocity (baPWV, left) and heart-brachial pulse wave velocity (hbPWV, right)

測した。後者については、大動脈弁閉鎖によって生じる第Ⅱ心音および上腕動脈波の切痕の時間差を心臓から上腕までの脈波伝播時間とみなした。それぞれの脈波伝播時間で、身長から推定した動脈長を除し、両PWV値を算出し、baPWVを遠位（主に腹部）大動脈および下肢の動脈のスティフネス、hbPWVを近位大動脈および上肢の動脈スティフネスを反映する指標とみなした。血圧に関しては、上腕での血圧に加え、大動脈血圧を一般的伝達関数を用いた脈波解析法によって推定した⁵⁾。実験1では、アプラネーショントノメトリ法で計測した頸動脈脈波を用いて、また実験2では、エアプレチスモグラフィ法で計測した上腕動脈脈波から、それぞれ大動脈血圧を推定した。

1. 3 統計処理

実験1では、3群間の比較に一元配置分散分析を用い、F値が有意であった場合に、フィッシャーの事後検定を実施した。実験2では、運動教室期間前後での比較に、対応のあるt検定を実施した。統計学的有意水準は5%とした。

2. 研究結果

2. 1 研究1

表1に3群の身体特性を示す。3群間の年齢、身長、BMI、上腕および大動脈血圧に有意差は認められなかった。上腕動脈脈圧は、非活動群に比して活動群と海女群が有意に低値を示した。また、海女群の心拍数は非活動群に比して有意に低値であった。

図2に動脈スティフネスの比較を示す。

表1 Physiological characteristics of Study-1

Variables	Physically inactive	Physically active	Pearl diver
n	50	33	115
Age, yrs	66 ± 9	64 ± 10	66 ± 10
Postmenopausal, n (%)	47 (94%)	27 (84%)	107 (93%)
Height, cm	154 ± 5	154 ± 5	154 ± 6
Body weight, kg	56 ± 9	57 ± 7	57 ± 8
Body mass index, kg/m ²	23.4 ± 3.4	23.7 ± 2.6	24 ± 3.2
Heart rate, bpm	68 ± 10	64 ± 11	63 ± 12 *
Brachial systolic BP, mmHg	140 ± 17	132 ± 16	133 ± 19
Brachial diastolic BP, mmHg	86 ± 10	84 ± 10	83 ± 10
Brachial PP, mmHg	54 ± 12	48 ± 10 *	50 ± 12 *
Aortic systolic BP, mmHg	128 ± 18	122 ± 15	123 ± 18
Aortic diastolic BP, mmHg	86 ± 10	84 ± 10	83 ± 10
Aortic PP, mmHg	42 ± 14	38 ± 11	39 ± 12

Data are mean and SD. * P<0.05 vs. Physically inactive. BP, blood pressure; PP, pulse pressure

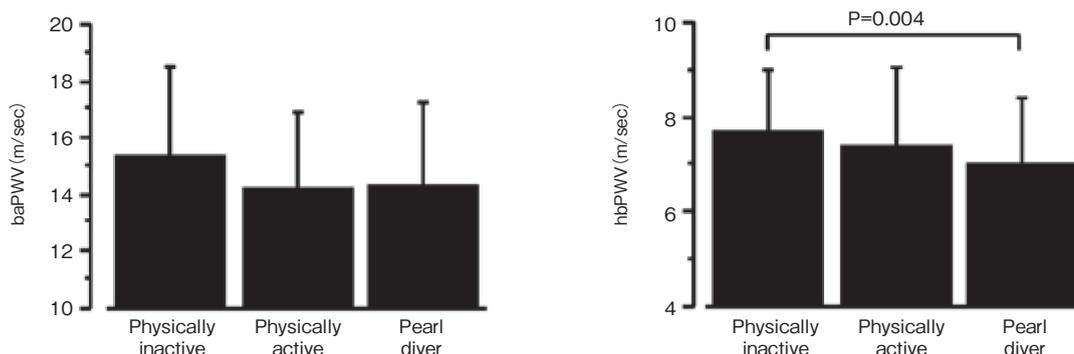


図2 Comparisons of pulse wave velocity (PWV) among pearl divers and age-matched women: Left: brachial-ankle pulse wave velocity (baPWV) ; Right: heart-brachial pulse wave velocity (hbPWV) Data are means and SD

baPWV には3群間における有意差は認められなかったが、hbPWV では、海女群が非活動群に比して有意に低値を示した。

2. 2 研究 2

表 2 に、トレーニング介入前後の身体特性の変化を示す。トレーニング介入後、体重、BMI、心拍数に有意な変化は認められなかった。上腕動脈および大動脈の収縮期血圧がトレーニング介入前に対して介入後に有意に低値を示した (いずれも $P<0.05$)。また、上腕動脈および大動脈の拡張期血圧と脈圧がトレーニング介入前に対して介入後に低下する傾向を示した (いずれも $P<0.10$)。

図 3 に動脈スティフネスの比較を示す。baPWV はトレーニング介入前に対して介入後に有意に低値を示した ($P=0.005$)。一方、hbPWV に有意な変化は認められなかった ($P=0.364$)。

3. 考 察

我々は、海女の動脈スティフネスが、同年代の運動習慣のない女性よりも有意に低値であることを報告した⁵⁾。有酸素性運動を習慣的に行うと、加齢に伴う中心動脈スティフネスの増大を抑制・改善できる⁴⁾。しかし、海女の身体労作は息こらえを伴う潜水の繰り返しであり、有酸素性運動ではない。さらに、水中でのエネルギー消費を抑えるために、ダイナミックな四肢の運動をほとんど行わない。それゆえ、海女の動脈スティフネスが低く維持されていた機序は、従来報告されているような習慣的身体活動による動脈スティフネスの改善の機序とは異なるものである可能性がある。そこで、我々は、海女においては、水圧による静脈還流の増大が、有酸素性運動と同じような一回拍出量の増大、およびシエアストレスの増大をもたらし、動脈の構造・機能に好影響を与えたと推

表 2 Physiological characteristics of Study-2

Variables	Before training	After training
Height, cm	160 ± 9	
Body weight, kg	59.3 ± 11.2	58.8 ± 10.9
Body mass index, kg/m ²	23.1 ± 3.5	22.9 ± 3.4
Heart rate, bpm	66 ± 8	65 ± 5
Brachial systolic BP, mmHg	116 ± 10	109 ± 12 *
Brachial diastolic BP, mmHg	69 ± 9	66 ± 10
Brachial PP, mmHg	47 ± 7	43 ± 6 *
Aortic systolic BP, mmHg	111 ± 9	104 ± 11 *
Aortic diastolic BP, mmHg	47 ± 7	43 ± 6
Aortic PP, mmHg	42 ± 6	38 ± 5

Data are mean and SD. * $P<0.05$ vs. Physically inactive. BP, blood pressure; PP, pulse pressure

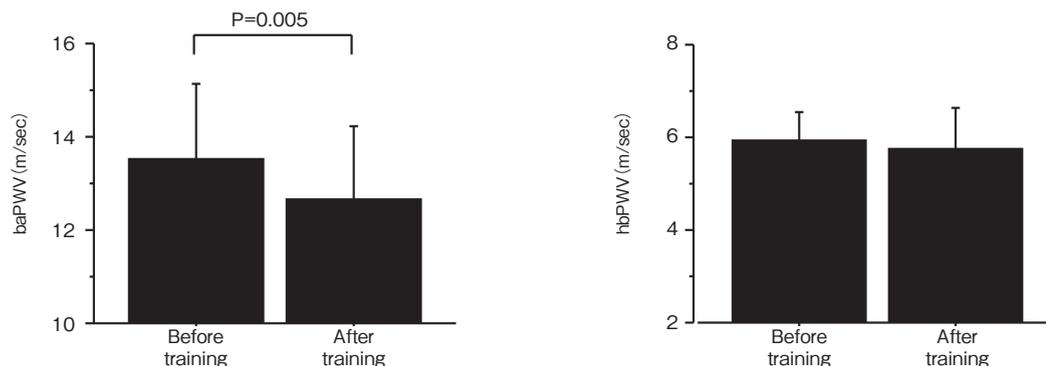


図3 Comparisons of pulse wave velocity (PWV) before and after the aquatic exercise training intervention
Left: brachial-ankle pulse wave velocity (baPWV) ; Right: heart-brachial pulse wave velocity (hbPWV)

Data are means and SD

察した。ここで、我々の推察通りであるとすれば、このような循環動態が著明な心臓により近い近位大動脈にもっとも大きな適応が生じるかもしれない。実際、研究1において、海女と同年代の女性との間で動脈ステイフネスの部位特性を比較したところ、海女の近位大動脈ステイフネスが、同年代の運動習慣のない女性よりも有意に低値であることが明らかとなった。一方、腹部大動脈を主体とする動脈ステイフネス指標に有意差は認められなかった。このことは、我々の推察を支持するものであり、潜水運動の繰り返し、近位大動脈という部位特異的な機能改善をもたらした可能性を示唆する。

上記のように、海女の身体労作の有効性が確認されたとしても、この効果を海女でない一般成人に適用することは非常に困難であろう。しかし、水圧という外的刺激を活用することにより、これまでに確認されている「動脈機能に対する有酸素性運動の効果」への相加効果を生み出すことができるかもしれない。このような背景から、有酸素性運動を主体とする水中での身体活動が、中高齢者の近位大動脈の機能改善に有効か否かを、短期間の運動トレーニング介入研究を通じて、検討することとした。

有酸素性運動を主体とする水中運動を習慣的に行うことで、近位大動脈の機能的適応が生じるという仮説を立てたが、それとは異なり、トレーニング介入後に、 $hbPWV$ に有意は確認できなかった。近位大動脈における機能的適応に、水圧による静脈還流量の増大が関与しているとするならば、胸部水位での水中運動と海女の潜水深度との違いが結果の相違に関与しているのかもしれない。また、3か月という短い介入期間で、かつ週1回という低頻度であったことが、有意なトレーニング適応をもたらさなかった理由かもしれない。しかしながら、そのようなトレーニング条件であったにもかかわらず、上腕および大動脈収縮期血圧と

$baPWV$ に有意な低下が認められた。仮説とは異なる結果ではあるが、週1回という低頻度であっても、3か月程度の水中運動の実施で、心血管系疾患の発症リスクである大動脈血圧や動脈ステイフネスを下げることができたことは、非常に意味のある結果といえる。

本研究からは、習慣的な水中運動トレーニングによる動脈ステイフネスおよび大動脈収縮期血圧の低下の機序を明らかにすることができない。それゆえ、今後、一過性の水中運動中の循環動態などを明らかにするなどし、トレーニング効果の機序解明を進める必要がある。また、少人数の健全な中高齢者に限った検討であったことから、高血圧症や糖尿病など、加齢以外の心血管系疾患リスクを保有する者など、対象者の拡大し、同様の分析を進めることが、心血管系疾患の発症予防における水中運動の有効性を一般化する上で重要と考えられる。

4. 結 論

水中運動以外の有酸素性運動を習慣的に行っている中高年女性と同年代の海女とで近位大動脈の拍動緩衝機能を比較したところ、海女の近位大動脈ステイフネスが、同年代の運動習慣のない女性よりも有意に低値であることが明らかとなった。一方、腹部大動脈を主体とする動脈ステイフネス指標に、有意差は認められなかった。一方、水中運動を用いた3か月間のトレーニング介入においては、トレーニング後、中高齢者の近位大動脈ステイフネス指標に有意な変化は認められなかった。しかしながら、上腕および大動脈収縮期血圧と $baPWV$ に有意な低下が認められた。以上の結果は、低頻度かつ短期間の水中運動実施は、近位大動脈の機能的適応を生じえないものの、心血管系疾患の発症リスクである大動脈血圧や動脈ステイフネスを改善できる可能性を示唆する。

謝 辞

運動教室を実施して下さった茨城県牛久市役所健康増進課職員およびNPO法人つくばアクアライフ研究所の皆様、実験のデータ収集にご協力いただいた筑波大学体育系前田清司教授、福家真理那さん、山邊貴之さんに感謝申し上げます。

本研究を遂行するにあたり、助成を賜りました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に心よりお礼申し上げます。

文 献

- 1) Nichols W., O'Rourke M.F., *McDonald's blood flow in arteries theoretical, experimental and clinical principles, 5th ed.*, London: Hodder Arnold (2005)
- 2) Tarumi T., Ayaz Khan M., Liu J., Tseng B.Y., Parker R., Riley J., Tinajero C., Zhang R., Cerebral hemodynamics in normal aging: Central artery stiffness, wave reflection, and pressure pulsatility, *J. Cereb. Blood Flow Metab.*, **34**:971-978 (2014)
- 3) Tomoto T., Sugawara J., Nogami Y., Aonuma K., Maeda S., The influence of central arterial compliance on cerebrovascular hemodynamics: Insights from endurance training intervention, *J. Appl. Physiol.* (1985), **119**(5):445-451 (2015)
- 4) Tanaka H., Dinunno F.A., Monahan K.D., Clevenger C.M., DeSouza C.A., Seals D.R., Aging, habitual exercise, and dynamic arterial compliance, *Circulation.*, **102**:1270-1275 (2000)
- 5) Tanaka H., Tomoto T., Kosaki K., Sugawara J., Arterial stiffness of lifelong Japanese female pearl divers, *Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.*, **310**:R975-978 (2016)
- 6) Tsuchikura S., Shoji T., Kimoto E., Shinohara K., Hatsuda S., Koyama H., Emoto M., Nishizawa Y., Brachial-ankle pulse wave velocity as an index of central arterial stiffness, *J. Atheroscler. Thromb.*, **17**:658-665 (2010)