

心拍変動係数を用いたスクーバダイビング中における自律神経系活動の評価

田中博史、遠藤俊郎、只隈伸也、
春日芳美、横矢勇一、琉子友男

大東文化大学スポーツ・健康科学部

An evaluation of autonomic nervous activity in scuba diving in terms of heart rate variability coefficient

Hiroshi Tanaka, Toshiro Endo, Shinya Tadakuma,
Yoshimi Kasuga, Yuuichi Yokoya, Tomoo Ryushi

Department of Sports and Health Science, Daito Bunka University

【緒言】

スクーバダイビングはレギュレーターを介してタンク内に充填されたエアーを呼吸に使用しながら水中を自由に移動することができるスポーツである。スポーツの多くが大気圧下で行われるのとは異なり、水圧が加わることによってもたらされる環境変化によって、生体に与える影響が極めて大きいスポーツである²⁰⁾。その環境の変化により、減圧症に代表される各種潜水障害の発生リスクを含んだスポーツでもある。

より安全にスクーバダイビングを楽しむためには実際のスクーバダイビングシーンにおいて生体に生じる各種生理応答を理解したうえで、その発生の機序について医学的な観点からの検討が十分に成されていなければならない。しかしながら、実際のスクーバダイビング中での各種生体情報の記録については、水中という特殊な環境から測定器の防水性や耐圧の問題から測定が困難であり報告が極めて少なかった。わずかに、水中ホルター心電計を用いて潜水中における不整脈の発生状況を調査した研究が報告されているのみであった^{3) 12)}。そこで我々は、まずスクーバダイビング中の生体変化について測定を可能にするため潜水用手部ドライケースを開発し^{17) 18)}、スクーバダイビング中に徐脈が生じることを明らかにした。しかしながらその発生機序についての検討が課題として残った¹⁹⁾。

潜水時に徐脈の発生する機序については、潜水反射によるものであるといわれている。頭部を水

面下に沈めた時に副交感神経支配となり、著明な徐脈とともに心収縮力の低下がおこるといわれている²⁾。息こらえ潜水中の心機能に関する研究においては、徐脈発生の機序として潜水反射による強い副交感神経反応刺激が洞結節の自動能や房室結節の伝導能を抑制するため¹³⁾と述べられており、さらに、飽和潜水中の心血管自律神経機能の変化について検討した報告では、心臓副交感神経系は高圧下徐脈における初期のモジュレーターであると報告されている⁹⁾。これらの報告では徐脈の発生する機序は自律神経系機能の働きによるものであると考察されているがいずれの研究も実際のスクーバダイビング中の測定は行われていない。また、我々の研究¹⁹⁾においても SpO_2 の変化や徐脈の発生について自律神経系機能の働きによるものではないかという仮説を立ててはいるものの、実証までに至っていない。しかし、現在報告されている実際のスクーバダイビング中の自律神経活動を測定・評価した研究において、スクーバダイビング中の自律神経活動に関するフィールド研究が欠けていることを指摘しながら、スクーバダイビング中は副交感神経活動の亢進と交感神経活動の低下を誘発するということを実験レベルで明らかにしている¹⁾。これらのことより、実際のスクーバダイビング中の自律神経活動について実証した研究はまだ例が少なく、多くの事例での検討を必要とするものであると考えられる。

自律神経系機能の検査法は種々存在するが、その中でも心臓の拍動間隔に観察される生理的かつ自発的なゆらぎである心拍変動 (heart rate variability : HRV) を用いた検査法は多くの研究で自律神経機能指標として一般的に用いられている検査法であり、その有用性を示す多くの事実がある⁵⁾。得られた時系列データは統計的手法、周波数解析等の解析方法により自律神経機能が評価される。心拍の変動係数を用いた解析法の一つである Coefficient of Variation R-R (CV_{R-R}) は副交感神経機能の状態を反映するものであるとされており¹⁵⁾、方法は簡便で、非侵襲的で客観的な定量的検査法として評価され普及している。水中での HRV の測定についてはすでに実績がある¹⁾が、この CV_{R-R} でのスクーバダイビング中の自律神経機能の評価は見あたらない。

そこで本研究はスクーバダイビング中の HR 及び HRV を測定し、HRV を CV_{R-R} で解析を行い、スクーバダイビング中における自律神経系機能を明らかにするとともに、 CV_{R-R} を用いた解析法による評価の有用性について検討することを目的として行った。

【方法】

I 対象

本研究の対象者は大学生6名(男性3名、女性3名)(平均年齢21歳7ヶ月)であった。対象者は当該年度に行われた大学の健康診断において、特記すべき異常が認められない健康成人であり、スクーバダイビングのスキルは中級レベルであった。本実験はヘルシンキ宣言を遵守し、被験者にはあらかじめ本研究の趣旨、データの取り扱い、本実験における安全性とリスク等について書面及び口頭にて説明し、書面にてインフォームドコンセントを得た上で実験を開始した。また、被験者としてこの実験に参加することは自身の任意であり、参加によって以後の単位取得等を含めた学生生

活に一切関係がないこと、参加の拒否によって不利益が生じることはないことを説明し、完全なボランティアとしての参加であることの理解を得て参加してもらった。

なお、本研究は大東文化大学スポーツ・健康科学部研究倫理審査委員会の承認を受けて行われたものである。

II 測定機器及び測定手順

HR 及び HRV の測定には Polar 社 (Finland) 製心拍計 S810i とトランスミッター WearLink31C を用いて行った。トランスミッターの胸部への固定は通常専用バンドを用いるが、本実験においては、より正確なデータを取得するため WearLink エレクロードアダプタをトランスミッターに取り付け、専用ディスプレイ型電極を使用して胸部へ直接貼り付けて測定を行った。なお、この心拍計の防水性能については淡水において水深 30 m までの使用についてメーカーが保証している。水中での使用については他の研究¹⁾においても実証されている機器である。測定中のスクーバダイビングはウェットスーツを着用し通常スクーバダイビングで使用するすべての機材を使用して行った。タンクについても通常スクーバダイビングにて使用されるものと同じタンクを使用した。タンク内に充填されているガスは、専用コンプレッサーを使用して大気中の空気をフィルターを通じてタンク内に充填したものであり、大気中の空気の分圧と変わらないものである。また、スクーバダイビングにて使用されるタンクは 5 年に 1 度の検査が法律で義務づけられているが、本実験で使用したタンクは法定の検査を実施済みのものであった。

測定は、水面 (0 m) と水深 4 m にレギュレーターからの呼吸でそれぞれ 5 分間滞在してもらった。測定中は伏臥位にて静止するように指示し、泳ぐ等の行為は禁止した。また、ゆっくり大きな呼吸を心がける様に指示し、呼吸を止めるなどのスキップ呼吸及び水面での測定中においてはレギュレーターをはずして通常呼吸とすることを禁止した。実験中は安全を考慮し、プールサイド及び水中にてダイビングのインストラクターに監視をお願いした。また対象者には異変を感じたときにはすぐに中止して浮上するようにあらかじめ指示を与えてから実施した。0 m 及び 4 m での測定は別々に行い、測定の順番は無作為とし、3 名は 0 m から先に行い、3 名の対象者については 4 m から先に実施した。

III データの解析

実験により得られたデータは心拍計内蔵メモリから Polar 社専用ソフト (Polar Pro Trainer software) を介して HR 及び R-R interval (RRI) の時系列データを抽出した。データは 0 m 及び 4 m における対象者毎の HR と取得したデータの中央部分 100 拍における RRI の平均値及び標準偏差を算出した。本研究では、自律神経系機能検査法の中から RRI の変動係数を用いた方法である Coefficient of Variation R-R (CV_{R-R}) を用いた。100 拍の RRI より算出された平均値及び標準偏差を使用し、RRI の変動係数を算出し (SD/M) 百分率表示をしたものを CV_{R-R} とした¹⁵⁾。統計解析には SPSS version 15.0 を用いて、HR 及び CV_{R-R} について 0 m 時と 4 m 時の値を対応のある t 検

定にて検討した。なお、有意水準は5%をもって統計学的有意とした。

【結果】

HRは被験者全員が0mよりも4mの方が低値を示した。平均は0mでは 95 ± 14.6 bpm, 4mでは 78 ± 3.6 bpmであり、0mよりも4mの方が有意に低値を示した ($P < 0.000$)。

Subjects	A		B		C		D		E		F		Mean (all subjects)	
Depth (m)	0	4	0	4	0	4	0	4	0	4	0	4	0	4
M (bpm)	112	92	93	81	92	75	113	94	78	71	83	53	95	78***
SD	7.0	9.5	4.9	7.5	12.3	17.7	12.3	9.1	6.9	10.8	10.8	12.2	14.6	3.6

***: $p < 0.000$ as compared with 0m depth

表1. スクーバダイビング中における0m及び4mでのHR

CV_{R-R} の比較では、被験者全員が0mよりも4mの方が高値を示した。被験者全員のRRIの平均値及び標準偏差を使用して算出された CV_{R-R} は0mでは4.87, 4mでは6.29であり、0mよりも4mの方が有意に高値を示した ($P < 0.01$)。

Subjects	A		B		C		D		E		F		Mean (all subjects)	
Depth (m)	0	4	0	4	0	4	0	4	0	4	0	4	0	4
M (msec)	536.3	666.8	649.5	749.2	664.4	837.6	537.8	646.6	777.4	868.4	734.5	1187.6	650.0	826.0**
SD	35.0	117.8	34.9	78.2	93.8	172.7	65.7	96.8	72.3	134.0	114.4	219.2	31.7	51.9
CVRR	6.52	17.66	5.38	10.43	14.12	20.62	12.22	14.98	9.31	15.44	15.57	18.46	4.87	6.29

**: $p < 0.01$ as compared with 0m depth

表2. スクーバダイビング中における0m及び4mでのHRV

【考察】

本研究の結果より、スクーバダイビング中のHRは、被験者全員が0mよりも4mの方が低値を示し、統計学的に有意であったことから、スクーバダイビング中に除脈が発生することが確認された。我々がこれまでにに行った研究¹⁹⁾においてもスクーバダイビング中の除脈発生が確認されており、橋本⁴⁾ 池田¹⁰⁾の研究においても本研究と同様にHRは潜水前と比べて潜水中に低下すると報告し、スクーバダイビング中の除脈発生について確認がされている。このことより、今回の研究による除脈の発生が偶発的なものとは考えにくい。本研究の結果では0mから4m時へのHRの減少は9%～37%で被験者間にばらつきはあるものの平均では17%の減少であった。これは、

ダイビング中の HR の低下率は、潜水深度に関係なく平均 15 % である¹⁴⁾と報告した先行研究¹⁴⁾とほぼ同じ値であった。しかしながら、除脈の生理学的発生機序についてはこれまでほとんど明らかにされていない。

潜水中の徐脈の発生機序については、全身が水に沈められることによって起こる潜水反射により心臓迷走神経活動が亢進することによって生じるといわれている²⁾。飽和潜水中のダイバーを対象とした研究によれば、特に圧縮期において除脈を発生させるきっかけとなるのが副交感神経であると示唆されており、高圧下での徐脈は正常圧、正常酸素から高圧及び高圧酸素状態への変化に対する生理学的適応の結果と考えられると報告されている⁹⁾。しかしこの研究は高圧曝露という面ではスクーバダイビングと同じであるが、飽和潜水中に行われており、一般的にレジャーで行われる無減圧限度時間内レベルでのスクーバダイビング中の環境とは異なる。また、川瀬らの研究¹³⁾においても除脈が生じる理由として潜水によってもたらされる潜水反射によって副交感神経支配が強まり、心臓の洞結節は房室結節の働きを抑制するためという報告がされているが、この研究は息こらえ潜水であり、スクーバダイビングとは根本的に異なった潜水方法である。これらのようにスクーバダイビングと異なった潜水方法であるため、これらと同じ発生機序であると述べられるのかは不明である。

自律神経系機能における評価の検査法として HRV を用いた検査法は、簡便でなおかつ非侵襲的手法であり、心拍の HRV の 1 拍ごとの変動を測定することにより心臓の自律神経緊張の指標とするものである⁸⁾。健常者の心拍のゆらぎは、安静時に大きく、心理的及び身体的ストレス時には減少する⁶⁾といわれており、それらの発生機序は、洞調律の HRV に見られる生理学的洞性不整脈にあたり、HRV は定常状態にある生体の正常な心周期に見られる自発的な内因性のゆらぎであるといわれている⁷⁾。これらのことと、安静時には主に副交感神経が優位で、心理的及び身体的ストレス時には交感神経優位になるという生体の特性を合わせて考えると、HRV は、副交感神経優位の時には安静時より大きくなり、逆に交感神経優位の時には安静時より減少すると判断することができる。

自律神経系の働きについての評価は血圧を利用した評価法などさまざまな方法が存在するが、実際のスクーバダイビング中の自律神経系機能の評価を行うにはデータを水中で取得しなければならず、測定器具の制限があるが、本研究においてはこれまでに水中における測定の実績がある¹⁾ HRV を用いて評価することとした。水中における HR や心電図の測定についてはこれまでいくつかの報告があるが、得られた心電図データから HRV の検討は行われておらず、潜水中の不整脈発生に関する検討にとどまっているが、これらの研究からも潜水時に発生する徐脈について確認されている^{3) 12)}。しかし、その発生の機序については実証した研究は極めて少なく¹⁾、今後多くの事例での検討が必要であると考えられる。

HRV は、これまでに多くの分野で自律神経機能の指標として扱われて、その有用性を示す事実も多く存在する⁵⁾ことから、自律神経機能検査として有用な手段といえる。自律神経系機能検査法は得られた時系列データを統計的な手法や周波数解析等、様々な解析方法が用いられ評価されて

いる。その中で本研究で用いた CV_{R-R} は副交感神経機能の状態を反映する評価法であるとされている¹⁵⁾。100 拍の RRI から算出される平均値及び標準偏差も用いて $CV_{R-R}(\%) = SD/M \times 100$ より、変動率として百分率で算出される。 CV_{R-R} は簡便、非侵襲的で客観的な定量的検査法として評価され普及している¹¹⁾。しかし、いくつかの使用上の注意も報告されている。 CV_{R-R} は健康者においても加齢に伴って変動が小さくなるため、被験者の年齢を十分に考慮した上で異常か否かを判定する必要があるといわれている¹⁵⁾。このことについて本研究の被験者は 20 歳～22 歳でありばらつきがないため問題ではない。また、 CV_{R-R} は一般的には副交感神経の機能を反映するものであるとされているが、体位変換試験における CV_{R-R} の変化をみた研究において臥位よりも立位で CV_{R-R} 値が低下したという報告¹⁶⁾があり、測定中はなるべく体位の変化が少ない状況で行う必要があるとされている。この点においても本研究については 0 m 滞在時は浮力に任せた伏臥位の状態、4 m 滞在時はプールに着底し伏臥位の状態で両条件ともに同じ姿勢をとっていることから姿勢の影響についてはないものと考えられる。さらに、不整脈の存在、服薬などの影響を受けることからこれらについても考慮入れて判断する必要があるとされている¹¹⁾が、本研究の被験者は事前の健康診断において不整脈の存在はなく、当日の口頭による体調チェックでこれらのことについてはまったく問題はなかった。

これまでに報告されているスクーバダイビング中の自律神経機能について明らかにした研究¹⁾では、レクリエーションでのスクーバダイビングは副交感神経系活動の亢進と交感神経活動の低下を誘発することを実験で明らかにしている。本研究の結果、被験者全員が 0 m よりも 4 m の CV_{R-R} が高値を示し、統計学的に有意であった。このことは、0 m よりも 4 m の方が副交感神経活動が亢進したことを示し、スクーバダイビング中は副交感神経優位となる事が明らかとなり、自律神経系機能検査の評価法には違いがあったものの、先行研究¹⁾と同様の結果を得たといえる。以上のことより、スクーバダイビング中の自律神経系活動の評価において CV_{R-R} を用いた解析の有用性が確認された。本研究の限界点としては、本来自律神経系機能の評価においては交感神経と副交感神経のバランスから評価することが重要であるが、本研究の手法である CV_{R-R} による評価法は副交感神経の状態を反映するもの¹⁵⁾とされていることから副交感神経活動しか評価できていないことである。従って、今後は交感神経と副交感神経双方からの検討が必要であることが課題として残された。

【文献】

- 1) Chouchou, F., Pichot, V., Garet, M., Barthélémy, J.C. and Roche, F. : Dominance in cardiac parasympathetic activity during real recreational SCUBA diving. *Eur J Appl Physiol.*, 106 (3), 345-352, 2009.
- 2) David Robertson : 心機能の自律神経性調節。ロバートソン自律神経学, 高橋昭, 間野忠明監訳。エルゼビア・ジャパン株式会社, 東京, pp.138-142, 2007.
- 3) 藤原正義, 中聡夫, 大西衛, 莊田容志, 蓮池俊明, 北村順子, 山本いつみ, 川崎大三, 小田茂彦, 志水栄伸, 榎谷充男, 大柳光正, 岩崎忠昭: 心筋梗塞後にダイビング復帰を希望されたスポーツダイバーの一例 — スクーバダイビング中ホルター心電図の試み —, 心臓リハビリテーション, 7, 131-134, 1996.
- 4) 橋本通: 高圧環境下, とくにスクーバダイビングにおける心肺機能, 臨床スポーツ医学, 22, 文光堂, 1495-1501, 2005.
- 5) 早野順一郎: 自律神経による身体機能調節とその異常。自律神経の基礎と臨床 改訂三版, 後藤由夫, 本郷

- 道夫編。株式会社医薬ジャーナル社，東京，pp.147-156，2006.
- 6) 早野順一郎：ストレスと自律神経，体育の科学，55 (5)，374-379，2005.
 - 7) 早野順一郎：ストレスと自律神経。運動とストレス科学，竹宮隆，下光輝一編。杏林書院，東京，pp.85-100，2003.
 - 8) 林博史:introduction。心拍変動の臨床応用－生理的意義，病態評価，予後予測－，林博史編。医学書院，東京，pp.1-17，1999.
 - 9) Hirayanagi, K., Nakabayashi, K., Okonogi, K., Shinozawa, T., Yamaguchi, N., Oinuma, M., Takada, H., Yajima, K. and Ohiwa, H. : Transient changes in autonomic cardiovascular function during a 4.1 MPa He-O₂ saturation dive. Japanese Journal of Aerospace and Environmental Medicine, 42 (1), 11-20, 2005.
 - 10) 池田知純：潜水と呼吸及び運動量。潜水医学入門－安全に潜るために－。大修館書店，東京，pp. 45-60，1995.
 - 11) 景山茂，持尾聰一郎，阿部正和：定量的自律神経機能検査法の提唱－心電図 R-R 間隔変動係数を用いた非侵襲的検査法－，神経内科 9，594-596，1978.
 - 12) 河合祥雄，久岡英彦：水泳・潜水に対するメディカルチェック－防水型ホルター心電計と簡易潜水反射－，水と健康医学研究会誌，4，29-34，2001.
 - 13) 川瀬晴美，河合直樹，下野和夫，山崎嘉久，矢嶋茂裕，久野保夫，津川昇，小林博，青木靖，伊藤亨，小坂孝二，清島満：水中心電図による水泳中および潜水中の不整脈の検討－若年健常者を対象として－，呼と循，46，791-796，1998.
 - 14) Lin, Y-C. and Mohri, M. : Hyperbaric bradycardia. Jpn J Hyperbaric Undersea Med., 34, 57-68, 2000.
 - 15) 持尾聰一郎：心電図 R-R 間隔変動 CV を中心に。自律神経機能検査第 4 版，日本自律神経学会編。株式会社文光堂，東京，pp.159-163，2007.
 - 16) 持尾聰一郎，桑田隆志，朝野次義：心電図 R-R 間隔の変動を用いた自律神経機能検査法の問題点－交感神経機能の影響の有無－，神経内科 18，403-405，1983.
 - 17) 田中博史，森口哲史，兵頭圭介，中間和男：スクーバダイビング中の小型医療機器を用いた測定を可能にする防水ケース開発に関する研究，大東文化大学紀要，43 (社会科学・自然科学)，279-287，2005.
 - 18) 田中博史，森口哲史，勝又宏，兵頭圭介，小田切優子，下光輝一：スクーバダイビング中の小型医療機器を用いた測定を可能にする防水ケースのデータの信頼性に関する検討，大東文化大学紀要，44 (自然科学)，17-24，2006.
 - 19) 田中博史，小田切優子，森口哲史，下光輝一：スクーバダイビング中における末梢血中酸素飽和度及び心拍数，宇宙航空環境医学，45 (2)，61-67，2009.
 - 20) Togawa, S., Yamami, N., Shibayama, M., Nakayama, H., Nozawa, T., Mano, Y., Yoshida, E. and Maruyama, M.: Evaluation of scuba diving work load. Jpn J Phys Fitness Sports Med., 55, 341-346, 2006.

(2014 年 9 月 26 日受理)