

浅海飽和潜水における基礎的体調の指標： 睡眠時の心拍変動

檜木 暢雄*¹ 毛利 元彦*²

松本 一弥*³

浅海飽和潜水は海洋生態系研究の手段として非常に有効であるが、その長期の閉鎖狭隘空間と高圧高密度ガス環境において、昼間の研究活動に悪影響を及ぼさない方法を用い、研究者の基礎的体調を客観的に把握する必要がある。そのため深度30m飽和潜水実験において4名の睡眠時脳電図や心電図を記録し、自律神経機能や睡眠状態を検討した。心拍変動（心拍数、心拍変動係数）より判定した睡眠覚醒水準は脳電図より得たものと非常に高い類似性を示し、簡便な方法での基礎的体調の把握が可能となった。さらに潜水の長期化に伴う睡眠の質的、量的変化があることも判明した。また心拍変動による睡眠水準の判定では、心拍数の水準に影響を及ぼす高圧徐脈や減圧性頻脈、さらに潜水後期における睡眠相と心拍変動の関係が変化することを考慮しなければならない。

キーワード：飽和潜水，自律神経，睡眠，心拍変動，科学潜水

Cardiac arrhythmias and heart rate changes as an index of basal conditions of shallow saturation scientific diver

Nobuo NARAKI*⁴ Motohiko MOHRI*⁵

Kazuya MATSUMOTO*⁶

Introduction : Marine ecosystem researchers can use the shallow saturation dive as research tools without serious physiological problems. However, we must watch their basal physiological and psychological conditions to avoid it being an obstacle in their activities. Then, we tried to evaluate their basal conditions with the analysis of heart rate variability during sleep.

Methods : The simulated saturation dive to a depth of 30m was conducted using four males subjects. Dive profiles totaled 18 days. Po₂ was maintained at 0.04~0.045MPa at hyperbaric phases. The Electrocardiogram : ECGs & Electroencephalogram : EEGs were recorded during light-out (from 23:00 to 07:00). The heart rate :HR and the coefficient of variation on ECG RR intervals : CV(R-R) of every minute were automatically measured, and, also, ECG RR intervals were analyzed by FFT (consecutive 256 beats, LF : 0.05-0.15Hz & HF : 0.20-0.40Hz). The sleep-awakefulness stages were assessed with EEG Polysomnogram every 20 seconds.

Results and Discussion : The sleep stages estimated from heart rate variability well agreed with the results from Polysomnogram. Total sleep time diminished at the end of a dive, caused by a decrease of deep sleep and REM sleep. The heart rate decreased during compression at a 30m depth and increased at the end of decompression. With the results of ECG R-R interval FFT analysis, the high heart rate during decompression was introduced by elevation of sympathetic nervous activity, but a low heart rate at 30m could not be explained. And also at the end of a dive, the relation between sleep stages and cardiac arrhythmias changed compared with the pre-dive.

Key Words : saturation dive, autonomic nerve, sleep, heart rate variability, scientific dive

* 1 海洋生態・環境研究部 3 G

* 2 海洋生態・環境研究部

* 3 東亜大学大学院 情報システム専攻

* 4 Marine Ecosystem Research Department 3G

* 5 Marine Ecosystem Research Department

* 6 Information Science, Graduate School East Asia

1 はじめに

浅海生態系研究の手段としての飽和潜水に関しては、これまでの有人シミュレーション潜水実験結果より、ヒトの活動能力を大きく減退させることは認められなかった。しかし場合によっては、非常に長期となる閉鎖狭隘空間と限られた人間関係、また窒素酔いの問題がある高分圧窒素と酸素中毒の心配がある高分圧酸素環境、さらに呼吸ガス交換に影響する高密度ガス条件という特殊環境下においては、外観からまた自分自身でさえ気がつかない基礎的体調の変化をきたすことが考えられる。しかし、実際の海中研究室での主任務は研究調査活動であり、基礎的体調指標の取得が研究活動に悪影響を及ぼしてはならない。そのため潜水研究者の基礎的体調の指標として、睡眠時の心拍変動より自律神経機能を検討した。

2 方法

測定は平成9年度の深度30m飽和潜水シミュレーション実験において、消灯23時から翌朝の起床07時までの、睡眠消灯時の4名の脳電図、眼球運動と心電図を連続的に有線記録した。使用した脳電図用電極は装着に負担の少ない表面電極とし、耳介を不関電極、前額部を接地、左右の頭頂部に、眼球運動記録電極を左目尻部に、さらに心電図用電極を左右胸側部に装着した。

睡眠覚醒水準の解析には、標準的なポリソムノグラフ法を用い、20秒間毎の脳電図と眼球運動の判読より、覚醒、体動、REM睡眠、さらに睡眠深度：1～4の計7段階とした。また心拍数のオンライン自動解析では、起床時に全夜に渡り1分毎の心拍数：HR、心拍変動係数：CV(R-R)（1拍毎の心電図R棘波時間の標準偏差/平均値より求められ、副交感神経機能の指標とされている¹⁾）と、心電図記録状態の指標となる解析時間率の全資料を表示できるものとした。心拍変動の詳細な検討を行うために、前述の自動解析結果において消灯後30分の10分間の心拍数と心拍変動係数をまとめ、さらに消灯後30分目の連続した256心拍のRR間隔の周波数解析（FFT、低周波領域LF：0.05～0.15Hz、高周波領域HF：0.20～0.40Hz、LF/HFは交感神経機能の指標とされている^{1, 2)}）により加減圧の影響を見た。

加減圧概要としては、事前観察期として加圧前深度0m空気環境下に4夜、深度30mの4気圧環境下に7夜、0mへの減圧期に2夜、さらに事後観察期として減圧後の0m環境下で4夜の計17夜であった。環境温は、適温の25～26℃、湿度は60±10%とし、高圧環境下の酸素分圧は、保圧期の0.4気圧～減圧初期の0.45気圧とした（図1）。被験者は、健康な男子ダイバー要員4名で、その年齢は21～35歳であった。

3 結果と考察

3.1 ポリソムノグラム法と心拍変動解析による睡眠覚醒水準の判定

図2にポリソムノグラフ法による睡眠覚醒水準：Sleep stageと心拍数：HR、心拍変動係数：CV(R-R)、解析時

間率の例として、最も安定した事前観察期第3夜の被験者Aの結果を示す。図2の睡眠覚醒水準は、深睡眠-浅睡眠-REM睡眠-（場合により覚醒）の約1時間半のリズムを繰り返し、さらに睡眠後半の明け方に深睡眠が減少するという、典型的な快適な睡眠状態であったことを示している³⁾。睡眠覚醒水準と心拍数と心拍変動係数の関係においては、覚醒時の高心拍数、深睡眠時の低心拍数と低心拍変動係数、REM睡眠期の低心拍数と高心拍変動係数の組み合わせにより、心拍数と心拍変動係数のみで非常に良く睡眠状態を把握することができた。また心拍数と心拍変動係数に基づく睡眠状態の判定と起床時の睡眠感聞き取り調査の結果は非常によく一致していた。そのため記録が複雑で解析に時間を要する脳電図を用いず、電極等を少数化し被験者の負担を軽減できる心電図小型テレメータ式記録や携帯型自動解析機により、終夜の睡眠状態が起床時に把握可能であれば、その応用範囲は非常に広いと思われる。

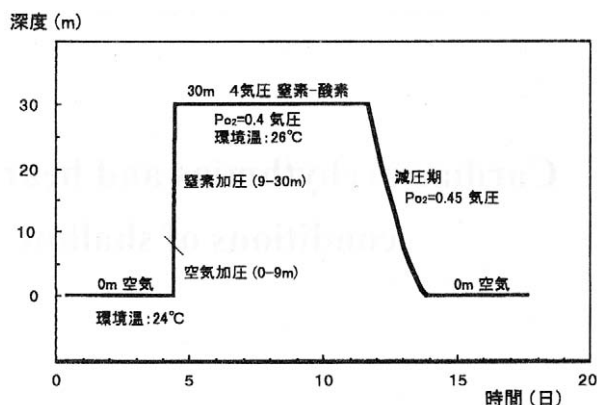


図1 窒素酸素の混合ガスを用いた深度30m模擬飽和潜水実験の加減圧概要

Fig. 1 Profile of simulated saturation dive to 30m depth with nitrogen and oxygen. oxygen partial pressure at hyperbaric phases was 0.04 MPa, ambient temperature was maintained about 24-25℃.

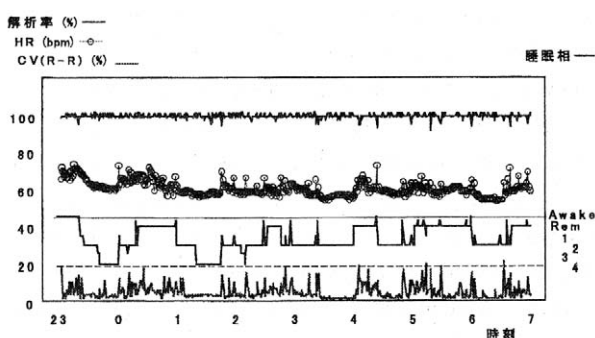


図2 終夜睡眠の心拍数（HR）、心拍変動（CV（R-R））、解析時間率と睡眠覚醒水準変化の一例
事前観察期第3夜、被験者-A
睡眠相：Awake-覚醒、0.5-体動、Rem-REM睡眠、1～4-睡眠深度

Fig. 2 An example of distribution of heart rate : HR (bpm), Coefficient of variation on ECG (RR) intervals CV (R-R) (%), Analysis time rate and Sleep-wakefulness stages. typical example, third night of pre-dive on subject-A Sleep stage : Awake, Body movement, Rem-REM sleep, 1～4-sleep depth

3.2 飽和潜水環境における睡眠

全実験期の睡眠状態の変化を検討するために、各睡眠覚醒水準が23時から翌朝07時までの全消灯時間に占める時間の割合を図3に示す。図では、覚醒と体動、浅睡眠として睡眠深度1と2、深睡眠として3と4を合計している。精神的安定状態への影響が軽重と意見の分かれるREM睡眠は、事前観察期に正常範囲の約0.25であるが、30m保圧期から減圧期にかけて漸減し、事後観察期にやや回復している。深睡眠も変動はあるものの、最も安定したと考えられる第3夜以後は漸減傾向にある。さらに浅睡眠は、比較的良好に維持されているものの、減圧期以後はかなり減少している。実験後半においては睡眠全体の減少に伴い覚醒・体動が増えており、起床時の聞き取り調査等からも、睡眠の断裂、睡眠不足感や疲労倦怠感の訴えと一致している。その原因としては運動不足だけではなく、狭い空間での対人関係や単調な隔離環境という心理的要素も大きいと考えられる。

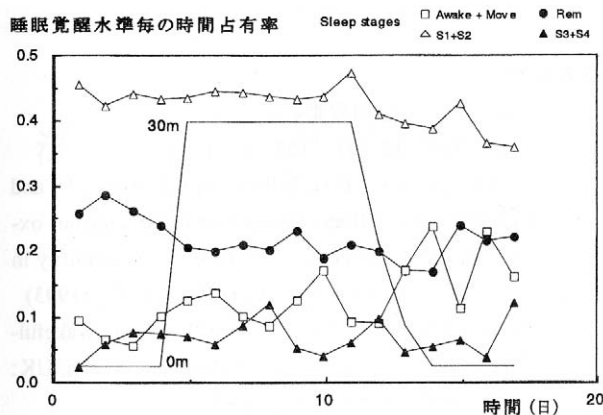


図3 水準毎の睡眠時間が全消灯時間に占める割合 (4名の平均)

□: 覚醒+体動, ●: REM睡眠,
△: 睡眠深度1+2, ▲: 睡眠深度3+4

Fig. 3 Time ratio of each Sleep stage to the total light-out (mean of 4 subjects)

□: Awake+body movement, ●: REM sleep,
△: Sleep stage 1+2, ▲: Sleep stage 3+4

3.3 飽和潜水環境下の睡眠時心拍数と心拍変動

飽和潜水環境が睡眠時心拍数に及ぼす影響を概観するため、消灯後約30分の10分間の資料(消灯後25~35分に自動解析で得られた1分毎の心拍数と心拍変動係数)を検討した。30m環境では心拍変動係数の変化なしに心拍数が約10拍/分減少し、減圧期には心拍変動係数の漸増に伴い心拍数が顕著に増加している(図4a & b)。この高圧環境下の心拍数低下の幅は、各種の浅海飽和潜水で得られたものとほぼ同程度である⁴⁾。この心拍数の変化は心拍変動係数を指標とする副交感神経機能だけでは説明できないため、副交感神経と拮抗作用のある交感神経機能の指標として心電図R棘波間隔のFFT解析を行った。周波数解析の結果では、呼吸を介する副交感神経機

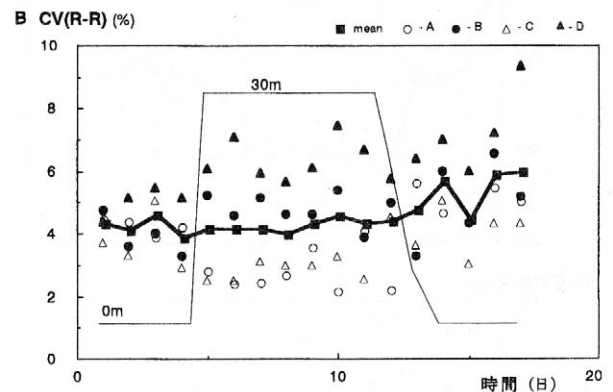
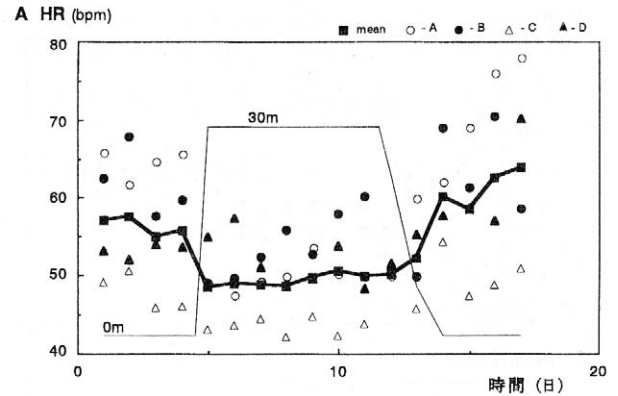


図4 消灯後30分の10分間の心拍数(HR)と心拍変動(CV(R-R)) (4名とその平均)

Fig. 4 Changes of HR and CV(R-R) for 10 minutes, 30 minutes after the light-out. 4 subjects & mean.

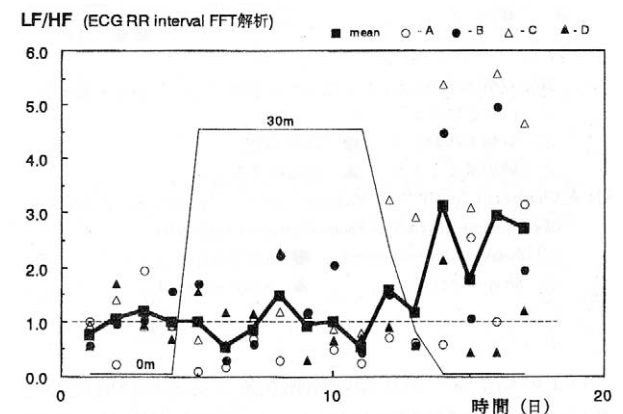


図5 消灯後30分の256心拍の周波数解析FFT: LF/HFの加圧前変化率 (4名と平均)

低周波領域 LF:0.05-0.15Hz, 高周波領域 HF:0.20-0.40Hz

Fig. 5 LF/HF ratio analysed from consecutive 256 beats FFT, 30 minutes after the light-out.

Low frequency range LF:0.05-0.15Hz, High frequency range HF: 0.20-0.40Hz, 4 subjects and mean.

能の指標である高周波領域HFは減圧期に若干低下する傾向があり、また圧受容器を介する交感神経機能の指標である低周波領域LFは減圧期に増加し、そして交感神経機能の指標としてより好ましいとされている低周波数領域と高周波数領域の比: LF/HFは、減圧期に顕著に増加している(図5)。

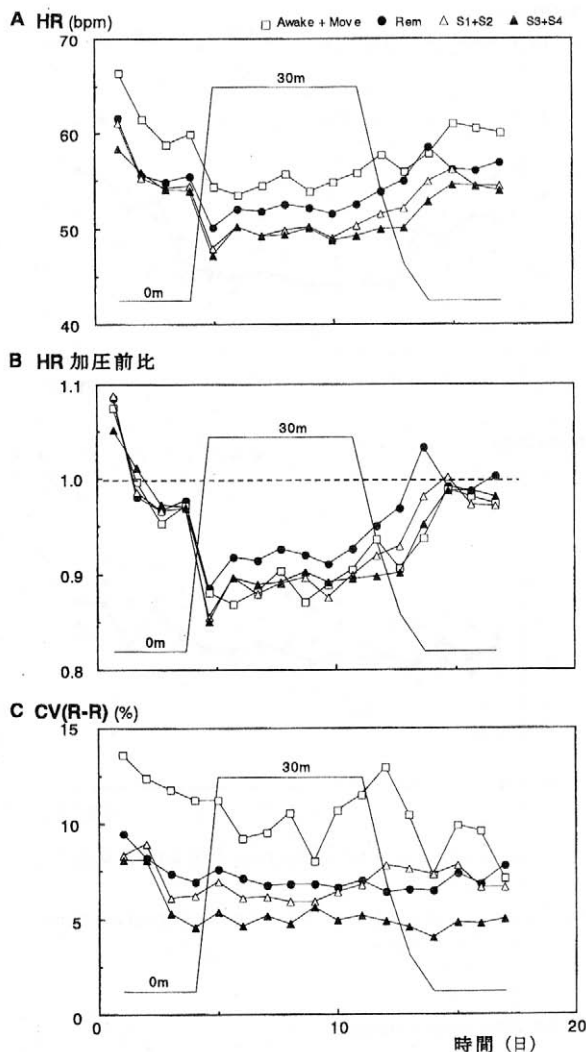


図6 睡眠覚醒水準毎のC-心拍数、Ca-心拍数の加圧前からの変化率とC-心拍変動係数

□: 覚醒+体動、●: REM睡眠、
△: 睡眠深度1+2、▲: 睡眠深度3+4

Fig. 6 Changes of A: HR, B: HR change ratio from Pre-dive and C: CV(R-R) of each sleep-wakefulness stages (mean of 4 subjects)

□: Awake+body movement, ●: REM sleep,
△: Sleep stage1+2, ▲: Sleep Stage3+4

以上の結果より減圧期の頻脈現象が交感神経機能の亢進によることは推測されるが、30mの高圧環境時の徐脈現象は説明ができない。また高圧環境下の心拍数の減少は、潜水徐脈や高圧徐脈として前世紀より研究されてい

るにも関わらず、高酸素分圧や高密度ガス呼吸の影響とされているが、今だに結論は出ていない⁵⁾。

最後に心拍数と心拍変動係数より睡眠覚醒水準を判定するために、全実験期の睡眠相毎の心拍数と心拍変動係数の変化を検討した。その結果、心拍数の実値では全睡眠期に同様の傾向が認められたが、各水準期の加圧前値との比較ではREM睡眠期の心拍数に及ぼす加圧の影響が最も小さいことが解る。また浅睡眠期の心拍変動係数は実験後期から減圧期にかけて増加し、REM期の値以上となっている(図6)。

以上のように、心拍数と心拍変動係数から飽和潜水を研究手段とする者の基礎的体調を左右する睡眠状態を見るには、潜水前期や中期はかなり良く判定できる。しかし、潜水後期の減圧期では、減圧に起因するか長期閉鎖空間滞在に起因するかは不明であるが、睡眠覚醒水準と心拍数、心拍変動係数の関係が変化するため、より詳細な判定では脳电图等の測定が必要である。しかし、実際の海中研究室に滞在し研究を実施している科学潜水者への負担軽減等を考慮すると、心拍変動による基礎的体調の判断はかなり有効な手段と思われる。

参考文献

- 1) 大塚邦明 "心拍変動の評価法", 呼吸と循環. 42 (2), 125-132. (1994)
- 2) GALLETLY, D. C., P. D. TOBIN, B. J. ROBINSON and T. CORFIATIS "Effect of inhalation of 30% nitrous oxide on spectral components of heart rate variability in conscious man. Clinical Science (85) 389-392. (1993)
- 3) Minors, D. S. and J. M. Waterhouse "Sleep and Wakefulness" In Circadian Rhythm and Human. London, UK: Johnwight & Sons, 95-119. (1981)
- 4) Eckenhoff, R. G. and D. R. Knight "Cardiac arrhythmias and heart rate changes in prolonged hyperbaric air exposures" Undersea. Bio. Med. Research, 11 (4), 355-367. (1984)
- 5) Lin, Y. C. "Hyperbaric bradycardia" In Physiological Basis of Occupational Health : Stressful Environments, edited by K. Shiraki, S. Sagawa & M. K. Yousef. 1996 SPB Academic Publishing, Amsterdam, The Netherlands 157-169. (1996)

(原稿受理: 1999年8月4日)