

呼吸周波数変動幅による NREM 睡眠領域検出

白水 重憲¹⁾, 近藤 英明²⁾, 森 佳織³⁾, 片山 宗哲¹⁾

要旨 ポリグラフと超小型軽量の心電・加速度・温度測定装置 (M-BIT) による同時測定を行い、前報で見出した RR 間隔変動から求めた呼吸周波数変動幅 (VRFRE) が NREM 睡眠時に減少する事を利用した NREM 睡眠領域検出法を提唱した。Rechtschaffen & Kales による国際睡眠判定基準による判定結果を基に、一致率を最大にする閾値を探した。閾値 0.053 Hz で、一致率 0.792, 感度 0.872, 特異値 0.469 であった。REM 睡眠時の VRFRE には、性差が存在する可能性も見出した。

キーワード : 呼吸周波数, 呼吸周波数変動幅, NREM 睡眠, RR 間隔変動, ポリグラフ

1. はじめに

前報で¹⁾, 我々は, ポリグラフと超小型軽量の心電・加速度・温度測定装置 (M-BIT) による同時測定を行い, Rechtschaffen & Kales による国際睡眠判定基準²⁾ による判定結果と微小体動による睡眠・覚醒判定結果を対比し, 副交感神経活動 (PSNS)・交感神経活動の指標 (SNS), 呼吸周波数 (RFRE) とその変動幅 (VRFRE) 及び平均心拍数 (HR) の睡眠の深さによる変化を求めた。この中で, VRFRE は睡眠の深さと共に変化し, 浅睡眠と深睡眠で小さく, 覚醒と REM 睡眠で大きく, その変化は顕著であり, この変化に基づく NREM 睡眠領域の推定の可能性が示唆された¹⁾。

微小体動による睡眠・覚醒判定は現在広く使用されているが, 体動の少ない被験者や動けない被験者では覚醒を睡眠と判定する。一方, 被験者の軀や外部からの振動により睡眠を覚醒と判定する等の問題点の存在も周知である。VRFRE による NREM 睡眠領域の推定法の確立は, 先に述べた微小体動法の問題点の補完のみならず, 微小体動法との併用により, REM 睡眠の領域の推定の可能性も期待できる¹⁾。

本研究では, ポリグラフと M-BIT による同時測定を行い, それぞれの測定結果から, 睡眠ステージと VRFRE を求めて, VRFRE による NREM 睡眠領域推定方法を考察した。更に, 比較の為にポリグラフで測定した心電データからも VRFRE を求め, 推定結果を比較した。

2. 測定と解析

2-1 被験者

被験者は医学部学生の自主研究のために polysomnography を行った 17 人, 男性 12 人, 女性 5 人で平均年齢は 21.4 ± 2.6 歳, 習慣性飲酒者, 喫煙者および内科的・精神科的疾患を有する者は除外した。表 1 に示すように, 7 名はポリグラフと M-BIT の同時測定を行い, 残りの 9 名はポリグラフの測定のみを行った。自覚的な睡眠状態は Pittsburgh Sleep Quality Index (PSQI) を用いて評価した。PSQI の global score の平均は 3.5 ± 1.5 (2 人が 6 で, 15 人が 5 以下) で日本人健常者とほぼ同じ結果であった。Polysomnography では睡眠呼吸障害や周期性下肢運動は認めず, 睡眠効率は $93.7 \pm 3.7\%$ であった。本研究は済生会長崎病院の倫理審査委員会の承認を得て公表する。

2-2 Polysomnography

脳波電極は睡眠覚醒段階を判定するための F3-M2,

1) NPO 法人セルフケア総合研究所

2) 済生会長崎病院睡眠医療センター

3) 森医院

受付日: 平成 25 年 3 月 5 日

採択日: 平成 25 年 3 月 15 日

表1 被験者

被験者	年齢(歳)	性別	ポリグラフ測定	M-BIT測定
1	21	M	○	○
2	21	F	○	○
3	21	F	○	○
4	22	F	○	○
5	22	M	○	○
6	20	F	○	○
7	21	F	○	○
8	23	M	○	
9	19	M	○	
10	19	M	○	
11	21	M	○	
12	21	M	○	
13	21	M	○	
14	18	M	○	
15	21	M	○	
16	23	M	○	
17	30	M	○	

F4-M1, C3-M2, C4-M1, O1-M2, O2-M1の単極誘導での記録を行った。電気眼球図, 両側側頭筋筋電図, 両側咬筋筋電図, オトガイ筋筋電図, 心電図, 前脛骨筋筋電図のための電極に加えて, サーモカップル法による鼻・口のエアフローセンサーと, 圧電法による胸部, 腹部バンドセンサーで呼吸運動を記録し, また, 体位センサー, いびきセンサー, パルスオキシメーターを装着した。デジタル脳波計は Neurofax EEG-1200® (日本光電), および Polymate AP1532® (デジテックス研究所) を使用し, 各チャンネルのサンプリング周波数は 500 Hz とした。睡眠段階の解析には NightOwl Professional® (のるぶろライトシステムズ) を用いて 30 sec を 1 エポックとし, 2007年 American Academy of Sleep Medicine のスコアリングルール³⁾ にもとづき視察判定を行った。

日本睡眠学会の国際判定基準の補足⁴⁾ に従い, 睡眠ステージのどれかと判断された最初のエポックを睡眠開始点とした。最初のエポックのステージが睡眠ステージ 1 の場合は, ステージ 1, 或いは他のステージが 3 分以上続いたときに限って, このエポックを睡眠開始点とした。

2-3 心電測定

M-BIT の詳細に関しては既に報告した¹⁾。心電測定回路・加速度センサー・温度センサー, 32 M バイトのメモリ, USB 接続プラグ, 電極との接続金具, 電源までのスタンドアロンで 24 時間の測定を行い, メモリに保存し, 外部と USB 通信する為の全ての機能を 40×39×8 mm の中に詰め込み, 重量 14 g とし

ている。各信号のサンプリング周波数は ECG が 128 Hz, 温度と加速度は 1 Hz である¹⁾。

M-BIT の ECG 測定に関する電極配置はモニター誘導である。II 誘導に類似しているといわれている。回路技術の工夫により, ボディアースは必要としないという特徴がある。M-BIT は超小型軽量である為, 2 つの電極を使用して被験者の胸部に貼り付ける形で装着する。電極と増幅回路の入力が近接している為, 交流ノイズの重畳がほとんどない品質の良い信号が得られる¹⁾。測定開始時の時刻としては, ポリグラフのコントロールシステムの時刻を記録した。

ポリグラフにおける ECG 測定の誘導は I 誘導或いは II 誘導であり, サンプリング周波数は 500 Hz 或いは 1000 Hz であった。DAT ファイルに記録されていた ECG 信号には交流ノイズが重畳していたので, ノッチフィルタを使用してノイズを除去した。

2-4 微小体動による睡眠・覚醒推定

まず, 加速度測定結果を基に, 1 分間毎に体動のあった 1 分間か体動のない 1 分間かを判定した。この判定では, できるだけ敏感に体動挙動を評価する為に, 各加速度成分の値の変化を使用した。また, ノイズの影響を取り除く為に, 実験的に定めたある閾値以下の変動は 0 とした。各サンプリング毎に得られる 3 つの加速度の成分の変化量のうち最大のものを選択し, さらに 1 分間中のそれらの中の最大のものをその 1 分間を代表する値とした。全解析範囲でのこの値の平均値を算出して, その 1/5 を閾値とし, これ以上の場合を「体動のある 1 分間」, これより小さい場合を「体動のない 1 分間」とした。

次に, この「体動のない 1 分間」が連続した領域群 (非活動領域) を探し, 隣り合う非活動領域の間隔が 1 分間或いはその間の活動レベルの平均が先に決めた閾値の 4 倍以下ならば連結して 1 つの非活動領域とした。

最終的には, これらの非活動領域を時間順に探索し, 「睡眠領域」を求めた。

睡眠領域の先頭の決定に当たっては,

- 1) 20 分間以下の長さの非活動領域で, その後 21 分間以上の活動領域が続く場合は睡眠領域の先頭では無い。
- 2) 15 分間以下の長さの非活動領域で, その後 16 分間以上の活動領域が続く場合は睡眠領域の先頭では無い。
- 3) 10 分間以下の長さの非活動領域で, その後 11 分間以上の活動領域が続く場合は睡眠領域の先頭では無い。

表2 微小体動法による睡眠開始・終了時刻

被験者番号	PSG		微小体動法		差	
	睡眠開始時刻	睡眠終了時刻	睡眠開始時刻	睡眠終了時刻	睡眠開始時刻	睡眠終了時刻
1	23:25:24	6:47:24	0:27:24	6:18:54	1:02:00	0:28:30
2	0:15:14	7:16:14	0:06:14	7:27:14	0:09:00	0:11:00
3	0:13:55	6:47:25	0:14:25	6:51:25	0:00:30	0:04:00
4	23:57:20	6:44:20	23:41:00	6:47:50	0:34:30	0:03:30
5	23:28:25	6:53:25	23:28:25	7:14:25	0:00:00	0:21:00
6	23:17:33	7:08:03	3:51:03	3:55:03	4:33:30	3:13:00
7	23:49:45	7:00:15	23:15:15	7:00:15	0:34:30	0:00:00
平均					0:59:09	0:37:17

4) 6分間以下の長さの非活動領域で、その後6分間以上の活動領域が続く場合は睡眠領域の先頭では無い。以上の4つのルールに基づき、全非活動領域を探索する事で行った。その後、こうして得られた睡眠領域の先頭と後続の非活動領域の間隔が30分以内で、かつこの間の活動レベルの平均が先に決めた閾値の2倍以下の場合、この非活動領域を睡眠領域に連結するという手順を繰り返して、「睡眠領域」を求めた。

2-5 RR 間隔の抽出

我々は世界中で幅広く使用されている頑健なリアルタイムQRSピーク抽出アルゴリズムをベースにした方法で、心電図波形上でR波の時間位置を求めた¹⁾。T波とR波の鋭さの違いに着目する事で、T波が非常に大きい幼児の場合でも、正確にR波のピークの時間位置を検出できるようにアルゴリズムに改良を施した¹⁾。RR間隔データの分布挙動に着目する事により、真のRR間隔データとアーティファクトを分別し、また、全解析範囲のRR間隔データと心電波形を同時に視察判定し、アーティファクトは全て棄却した¹⁾。

2-6 呼吸周波数 RFRE 及び呼吸周波数変動幅 VRFRE

我々は、RR間隔信号を周波数4Hzでリサンプリングして等間隔時系列とし、睡眠・覚醒判定と同様に1分間を解析時間単位として、1分間毎にSPWV (Smoothed Pseudo Wigner-Ville) 法を使用して時間周波数解析を行い、時間周波数MAPを得た¹⁾。時間周波数解析では、時間分解能と周波数分解能の両方を大きくする事はできない。本研究では周波数の挙動が重要であるので、周波数分解能を大きくするように調節した。

高周波成分の下限の0.15 Hz以上の周波数のRR間隔変動は呼吸性洞性不整脈^{5,6)}である事を基にしたJasson等の方式⁷⁾を拡張して、0.15 Hzから平均心

表3 微小体動法による睡眠覚醒推定：感度・特異値・一致率

被験者	感度	特異値	一致率
1	0.475	0.111	0.472
2	0.808	0.682	0.805
3	0.971	0.438	0.961
4	0.970	0.000	0.966
5	0.850	0.727	0.849
6	0.009	1.000	0.044
7	0.881	0.444	0.877
平均	0.709	0.486	0.711

拍数の半分の周波数⁸⁾までの範囲の瞬時中心周波数(CFR)を求め⁹⁾、更に、10秒間毎の平均値を求め、呼吸周波数RFREとした。更に、その1分間の変動を呼吸周波数変動幅VRFREとした。

尚、ポリグラフ測定の結果に基づくステージ判定の解析エポック長は30秒であるので、1分間毎に求めた微小体動からの睡眠覚醒推定結果、及びVRFREは前半の30秒の値=後半の30秒の値=1分間の値という方法で30秒エポックのものに変換し、ステージ判定結果と比較した。

3. 結果

3-1 微小体動による睡眠・覚醒推定

表2に、「ポリグラフ睡眠ステージ(PSG)」により得られた睡眠開始時刻及び睡眠終了時刻と、「M-BIT推定結果(微小体動法)から求めた睡眠開始時刻及び睡眠終了時刻」とを比較した。表3に、ポリグラフ睡眠ステージにより得られた睡眠開始時刻及び睡眠終了時刻の間の時間範囲に対する両方の方法の感度、特異値、一致率をまとめた。

睡眠ステージ1~4、及びREM睡眠と判定されたエポックを「睡眠エポック」とし、このエポックがM-BIT推定結果でも睡眠エポックと判定された割合を「感度」、ポリグラフ睡眠ステージが覚醒と判定したエ

ボックスを M-BIT 推定結果でも覚醒と判定した割合を「特異値」、判定が一致した M-BIT 推定結果のエポック数の総和の全エポック数に対する割合を「一致率」とした。

我々の微小体動法に関しては、前報では、感度、特異値、一致率の平均値は 0.939, 0.377, 0.895 であり、睡眠開始時刻の相違は最小で 0 分、最大で 18 分 30 秒であり、平均では 8 分、睡眠終了時刻の相違の最小は 0 分、最大は 3 分で、平均は 53 秒と比較的良好な結果が得られていた。これ以外にも、これまでの多くの測定例で、妥当な結果が得られている。

一方、本研究では、被験者 6 や被験者 1 のように外乱或いは躰等の影響により、実際には睡眠であるエポックの殆ど全てや半数が覚醒と判定されてしまい、感度・一致率が非常に低い値を示し、睡眠開始・終了時刻の相違が 1 時間以上の場合も存在した。それ以外にも、被験者 4 や被験者 7 のように睡眠開始・終了時刻の相違が 30 分以上のものも存在した。このような場合には、VRFRE による NREM 睡眠領域推定方法によるクロスチェックが必要と思われる。

3-2 NREM 睡眠領域の探索

我々は、VRFRE の仮の閾値からスタートした。この閾値を利用して、各エポック毎に NREM 睡眠であるか否かを仮に判定し、NREM 睡眠のエポックが連続する領域群を探した。この NREM 睡眠領域群のうち、長さが 30 エポック以上の領域群のみに着目して、VRFRE の最大値を求め、これに 0.9 を乗じたものを「閾値」とした。

こうして得られた VRFRE に関する閾値を使用して各エポックの判定を行い、NREM 睡眠の領域群を求め、更に、長さが 10 エポック以下の領域群は NREM 睡眠では無いと判定して、NREM 睡眠領域を求めた。

3-3 仮の閾値の最適化

ポリグラフ睡眠ステージを対象とした睡眠・覚醒判

定法の評価に一般に使用される感度・特異値・一致率を、「感度」は睡眠全般でなく NREM 睡眠のみを対象にし、「特異値」の対象は覚醒のみでなく REM 睡眠も対象とする事にして使用した。仮の閾値が小さければ、真の閾値も小さくなり、特異値は大きくなるが、感度は小さくなる。逆に、仮の閾値が大きければ、真の閾値も大きくなり、感度は大きくなるが、特異値が小さくなる。

我々は、VRFRE の仮の閾値を 0.0 Hz から 0.08 Hz まで 0.001 Hz 刻みで増加させて判定を行い、一致率が最大になる「仮の閾値」を探索した。表 4 に各被験者に対して、一致率が最大になった「仮の閾値」、及びその時の真の「閾値」、「感度・特異値・一致率」を示す。

「仮の閾値」は 0.049 Hz から 0.065 Hz に分布し、平均値は 0.061 Hz である。「感度」は 0.877 から 0.962 まで分布し、平均は 0.916、「特異値」は 0.059 から 0.683 まで分布し、平均は 0.455、「一致率」は 0.783 から 0.904 まで分布し、平均は 0.829 であった。微小体動法を補完する方法として十分な可能性があると思われる。

3-4 VRFRE 法

VRFRE による NREM 領域推定を実際的に使用する場合には、ポリグラフ睡眠ステージの情報が存在しないので、一致率を最大化する「仮の閾値」を探索する事ができない。「仮の閾値」の値はある値に固定して

表 5 VRFRE 法による NREM 睡眠領域の推測：真の閾値、感度・特異値・一致率（共通の仮閾値 0.061 Hz 使用）

被験者	閾値 (Hz) VRFRE	感度	特異値	一致率
1	0.053	0.943	0.168	0.786
2	0.052	0.837	0.728	0.818
3	0.053	0.854	0.599	0.804
4	0.054	0.929	0.701	0.881
5	0.054	0.891	0.269	0.767
6	0.054	0.901	0.505	0.811
7	0.054	0.747	0.311	0.678
平均	0.053	0.872	0.469	0.792

表 4 VRFRE による NREM 睡眠領域の推測：「仮の閾値」の最適値、閾値、感度・特異値・一致率

被験者	仮閾値 (Hz) VRFRE	閾値 (Hz) VRFRE	感度	特異値	一致率
1	0.065	0.058	0.877	0.497	0.800
2	0.065	0.058	0.916	0.585	0.859
3	0.049	0.044	0.877	0.579	0.820
4	0.057	0.050	0.962	0.683	0.904
5	0.053	0.047	0.919	0.234	0.783
6	0.054	0.048	0.901	0.547	0.820
7	0.057	0.050	0.959	0.059	0.818
平均	0.061	0.054	0.916	0.455	0.829

表6 VRFRE法による睡眠開始・終了時刻

被験者番号	PSG		VRFRE法 (PSG)		差	
	睡眠開始時刻	睡眠終了時刻	睡眠開始時刻	睡眠終了時刻	睡眠開始時刻	睡眠終了時刻
1	23:25:24	6:47:24	23:23:24	6:44:54	0:02:00	0:02:30
2	0:15:14	7:16:14	0:13:14	7:11:14	0:02:00	0:05:00
3	0:13:55	6:47:25	0:12:25	6:47:25	0:01:30	0:00:00
4	23:57:20	6:44:20	0:00:20	6:43:50	0:03:00	0:00:30
5	23:28:25	6:53:25	23:25:05	6:47:55	0:03:20	0:05:30
6	23:17:33	7:08:03	23:15:03	7:06:33	0:02:30	0:01:30
7	23:49:45	7:00:15	23:12:15	6:55:45	0:37:30	0:04:30
平均					0:07:24	0:02:47

おく必要がある。今後、「仮の閾値」の値は、ここに示した7例の「仮の閾値」の平均値である0.061 Hzを使用する事にする。

「仮閾値」0.061 Hzを使用して判定した7例の結果を表5に示す。感度は0.747から0.943まで分布し、平均は0.872、特異値は0.168から0.728まで分布し、平均値は0.469、一致率は0.678から0.881まで分布し、平均は0.792であった。仮閾値として各被験者に対する最適値を使用した場合に比べて、感度・特異値・一致率の低下は僅かであり、VRFREの仮閾値としての0.061 Hzの使用の妥当性が示された。以下、「VRFRE法」と呼称する。

表6に「VRFRE法による睡眠開始・終了時刻」をポリグラフ睡眠ステージによるものと比較する。睡眠開始時がNREM睡眠と仮定するのは妥当であるが、睡眠の終了時がNREM睡眠とは限らない。その意味で、睡眠開始時刻のほうが2つの方法の相違が小さい事が期待されたが、最大の時間の相違は睡眠時間の方で観察された。最大は37分30秒、次位は9分0秒で、最少は1分30秒、平均は7分24秒であった。睡眠終了時刻の相違の最大値は18分30秒、次位は17分30秒、最少は30秒、平均は6分56秒であった。

なお、興味深い事に、睡眠開始時刻が最も遅い午前0時37分30秒を示した被験者では、微小体動法もポリグラフ睡眠ステージとの相違が34分30秒と大きく、VRFRE法と微小体動法の睡眠開始時刻は近かった。

3-5 同時測定したポリグラフECGによる検討

VRFRE法の妥当性をより広く確認する為に、ポリグラフ測定のみが行われたデータでの検討を試みた。その第一歩として、まず、この被験者群のM-BITと同時測定したポリグラフの中のECGを使用した推定を試みた。

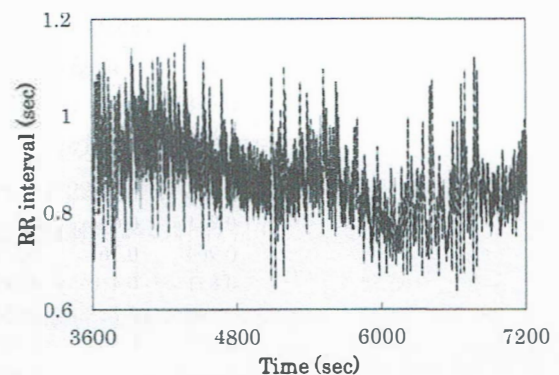


図1 PSGとM-BITによるECG信号から求めたRR間隔データの比較

PSG：灰色の実線、M-BIT：黒の破線

図1にM-BIT_ECGとポリグラフECGから求めたRR間隔データを比較して示す。この両者は元のECG信号のサンプリング周波数が異なるし、それぞれ、別個に電極の接触状態の悪化による信号品質の劣化(M-BIT)や交流ノイズの重畳(ポリグラフ)等のアーチファクトが混入し、フィルタリングやソフトウェアで除去する。このような背景の為に、図1に示した2つの方法で求めたRR間隔は完全に一致しているとはいえないが、少なくとも、目視が識別できるような相違は存在せず、実用的な目的の為に十分一致している。

検討結果を表7に示す。感度は0.686から0.919まで分布し、平均は0.838、特異値は0.280から0.904まで分布し、平均値は0.576、一致率は0.655から0.898まで分布し、平均は0.785であった。図1に示したRR間隔の一致性を反映して、これらの値はM-BIT_ECGのものと比較的良好な一致を示し、一致率の大きさの被験者間の順位も一致した。

3-5 その他ポリグラフECGによる検討

表8にポリグラフのみの測定を行った被験者8から被験者17までの結果をまとめる。感度は0.851から

表7 VRFRE法によるNREM睡眠領域の推測：真の閾値、感度・特異値・一致率（共通の仮閾値0.061Hz、ポリグラフECG使用）

被験者	閾値 (Hz) VRFRE	感度	特異値	一致率
1	0.049	0.799	0.570	0.752
2	0.054	0.824	0.857	0.830
3	0.054	0.843	0.566	0.789
4	0.052	0.896	0.904	0.898
5	0.054	0.902	0.280	0.778
6	0.054	0.919	0.369	0.794
7	0.054	0.686	0.489	0.655
平均	0.053	0.838	0.576	0.785

表8 VRFRE法による真の閾値、感度・特異値・一致率

被験者	閾値 (Hz) VRFRE	感度	特異値	一致率
8	0.054	0.958	0.072	0.723
9	0.054	0.879	0.206	0.706
10	0.054	0.917	0.221	0.792
11	0.053	0.926	0.258	0.729
12	0.053	0.961	0.094	0.746
13	0.053	0.964	0.167	0.772
14	0.054	0.851	0.410	0.762
15	0.054	0.890	0.215	0.750
16	0.053	0.914	0.369	0.785
17	0.053	0.917	0.451	0.836
平均	0.054	0.918	0.246	0.760

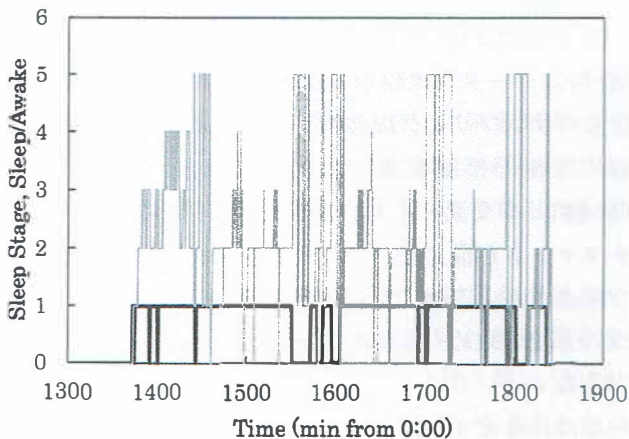


図2 PSG_ECGデータに基づくVRFRE法の結果と睡眠ステージ

黒い太い実線：VRFRE法の結果（睡眠：1，覚醒：0）
 灰色の細い実線：睡眠ステージ（0は覚醒，5はREM睡眠）

0.964まで分布し、平均は0.918、特異値は0.072から0.451まで分布し、平均値は0.246、一致率は0.706から0.836まで分布し、平均は0.760であった。表5及び表7の結果に比べて、感度が大きく、特異値が小さく、一致率は同程度である。

図2にポリグラフECGを使用したVRFRE法によるNREM睡眠領域推定結果と睡眠ステージの関係を示

す。残念ながら、ここで行われたポリグラフ測定では、睡眠開始時刻前にECGが測定された時間範囲が短く、VRFRE法による睡眠開始時刻決定が不可能であった。従って、ポリグラフECGからの結果に関して、睡眠開始と終了の議論は行わなかった。

特異値が小さいという事は、この被験者群のNREM睡眠のVRFRE閾値は、被験者1から7に比して小さめであるという事である。表1に記されているように、この相違の原因の一つとして被験者の性別が考えられる。被験者1から7は女性が主であり、男性は被験者1及び5のみである。一方、8から17はすべて男性である。更に、表5の結果では、被験者1の特異値が一番小さく、被験者5が次に小さい。表7の結果では、被験者5の特異値が一番小さい。これらの結果より、男性被験者はNREM睡眠のVRFRE閾値が小さめである事が示唆される。

3-6 睡眠とVRFRE及びRFRE

表9及び10に全ての被験者の浅睡眠、深睡眠、REM睡眠のVRFRE及びRFREの値を示す。REM睡眠時の値が小さい順に並べている。

表9に示したVRFREの場合、殆どの女性被験者の値が、表の最下段付近に集中する。男性と女性に分けて平均値を求め、有意差の有無を5%水準で確認¹⁰⁾すると、浅睡眠では0.027 Hzと0.030 Hzであるが、有意差はなく (p=0.372)、深睡眠では0.022 Hzと0.029 Hzで値の分布の相違は明瞭になり (p=0.056)、REM睡眠では0.037 Hzと0.046 Hzで有意差が存在する

表9 睡眠の深さとVRFREの値

被験者番号	性別	VRFRE (Hz)		
		浅睡眠	深睡眠	REM睡眠
8	M	0.024	0.019	0.030
13	M	0.026	0.024	0.033
9	M	0.030	0.026	0.033
1	M	0.020	0.013	0.034
12	M	0.025	0.016	0.035
6	F	0.022	0.022	0.038
5	M	0.030	0.026	0.038
15	M	0.031	0.028	0.038
14	M	0.033	0.028	0.038
16	M	0.022	0.021	0.039
10	M	0.028	0.023	0.039
11	M	0.028	0.022	0.040
7	F	0.037	0.034	0.040
17	M	0.026	0.018	0.045
3	F	0.032	0.033	0.045
2	F	0.033	0.033	0.052
4	F	0.025	0.023	0.053

表 10 睡眠の深さと RFRE の値

被験者番号	性別	RFRE (Hz)		
		浅睡眠	深睡眠	REM 睡眠
8	M	0.199	0.195	0.208
1	M	0.192	0.197	0.211
15	M	0.214	0.219	0.229
13	M	0.226	0.233	0.232
6	F	0.209	0.217	0.232
9	M	0.239	0.253	0.237
16	M	0.218	0.232	0.237
5	M	0.243	0.255	0.240
12	M	0.227	0.227	0.242
7	F	0.247	0.255	0.242
10	M	0.234	0.244	0.243
14	M	0.253	0.271	0.253
11	M	0.245	0.254	0.257
4	F	0.227	0.235	0.257
17	M	0.235	0.233	0.264
3	F	0.255	0.261	0.290
2	F	0.275	0.293	0.306

($p=0.041$)¹⁰⁾。今後、男女を区別し、共通の仮閾値 0.061 Hz ではなく、別々の仮閾値を用いて判定する必要があるものと思われる。

一方、表 10 に示す RFRE の場合も、女性被験者の値が表の最下段付近にあつまる傾向にあるが、顕著ではない。男性と女性の平均値も、0.227 Hz と 0.243 Hz (浅睡眠, $p=0.265$), 0.234 Hz と 0.252 Hz (深睡眠, $p=0.262$), 0.238 Hz と 0.265 Hz (REM 睡眠, $p=0.124$) と、女性の方が多い傾向があるが、有意差はない。

睡眠時の呼吸数 (bpm) の報告例は多い¹¹⁻¹⁴⁾。表 11 に、呼吸数として報告された値を 60 で割って呼吸周波数 (Hz) に換算した形で示す。睡眠前の覚醒時の呼吸周波数の値には 0.198 Hz という値も見られるが、その他は 0.228 Hz から 0.290 Hz に分布する。

NREM 睡眠時の呼吸周波数には 0.205 Hz という値もみられるが、主には 0.233 Hz から 0.267 Hz に分布する。NREM 睡眠時のこれらの値は、我々のものと良く一致する。表 10 にまとめた結果は定法に従った呼

表 11 睡眠時の呼吸周波数の報告値 (Hz, bpm での呼吸数より換算)

覚醒	NREM				REM	出典
	ステージ 1	ステージ 2	ステージ 3	ステージ 4		
0.228	0.240	0.237				11
0.233		0.258	0.263	0.263	0.263	12
0.265	0.250	0.247	0.250	0.250	0.265	13a
0.245	0.252	0.252	0.252	0.252	0.277	13b
0.243		0.252				14a
		0.263				14b
0.260		0.261				14c
		0.263				14d
0.290		0.267				
		0.255				
0.198		0.205				
0.235		0.258				
		0.263				
0.242		0.252				
0.270		0.263				
		0.262				14e
0.272		0.262				
0.240		0.247				
0.273		0.248				
		0.253				
0.250		0.250				
0.240		0.233				
		0.238				

各出典の被験者群情報

11) 男性 8 名, 女性 4 名, 年齢 21 ~ 37 歳 (平均 28)

12) 男性 8 名 (平均 32.4 歳), 女性 11 名 (平均 26.5 歳)

13) a 高齢群: 男性 5 名, 女性 6 名, 60 歳以上 b 統制群: 男性 6 名, 女性 6 名, 30 ~ 40 歳

14) a, b 男性 20 名年齢 30 ~ 55 歳 c, d 女性 20 名年齢 30 ~ 55 歳 e 文献値

吸測定によるものであり、我々のものはRR間隔変動の周波数位置によるものである。NREM睡眠で示された一致性は、我々の呼吸周波数推測方法の妥当性を示す。

REM睡眠時の呼吸周波数の報告値は0.263 Hz, 0.265 Hz, 0.277 Hzである。

本研究は、これまで多数の測定で観察されたVRFREの挙動を基にNREM睡眠領域検出法を提唱し、更に、実験的に得られた結果の統計解析によりVRFREの性差の可能性を発見した。しかしながら、このVRFRE、つまり、被験者毎の呼吸周波数変動幅に関する報告はない。

ここで根拠としているVRFREのNREM睡眠時の減少は次の様に説明される。NREM睡眠は一番安定した状態であり、NREM睡眠時には環境からの刺激の減少や大脳から延髄への下行性投射の消失などのために、換気量が減少し、その結果、動脈血のPCO₂はやや増加する。この為に、換気応答の閾値が上がり、CO₂感受性が低下する¹⁵⁾。従って、呼吸周波数の変動が小さくなる。

今後は、一人の被験者で多数日の24時間測定を行い、VRFRE及びRFREの挙動を把握し、生活行動の影響を検討する必要がある。また、女性のVRFREの値が大き目の理由として、まずは、性周期の影響が考えられる。この解明の第一歩として、まず、性周期の中での変化挙動を把握する必要がある。多数データの測定、或いは、24時間データの測定にはポリグラフとの同時測定は難しい。M-BIT単独で測定したデータより、微小体動法による判定結果とVRFRE法を比較して、NREM睡眠時のVRFRE及びRFREの値を推定する方法の確立が必要である。

参考文献

- 1) 白水重憲, 成澤 元, 片山宗哲他: 国際基準に基づいた睡眠ポリグラフ判定と超小型生体センサー(M-BIT)の測定データに基づく睡眠解析結果のケース比較. 全面発達の展開 2: 8-18, 2012.
- 2) Rechtschaffen A and Kales A: A manual of standardized terminology, techniques and scoring system for sleep stages of human subjects: Public Health Service, U. S. Government Printing Office. Washington. D. C. 1968.
- 3) Iber C, Ancoli-Israel S, Chesson A, Quan S. for the American Academy of Sleep Medicine. 1st ed. Westchester: IL: American Academy of Sleep Medicine; 2007. The AASM manual for the scoring of sleep and associated events: rules, terminology and technical specifications.
- 4) SLEEP COMPUTING COMMITTEE OF THE JAPANESE SOCIETY OF SLEEP RESEARCH SOCIETY (JSSR): Proposed supplements and amendments to "A Manual of Standardized Terminology, Techniques and Scoring System for Sleep Stages of Human Subjects", the Rechtschaffen & Kales (1968) standard. Psychiatry and Clinical Neurosciences 55: 305-310, 2001.
- 5) Novak P, Novak V, de Champlain J et. al. Influence of respiration on heart rate and blood pressure fluctuations: J Appl Physiol. 74: 617-626, 1993.
- 6) Novak P, Novak V. Time/frequency mapping of the heart rate, blood pressure and respiratory signals: Med Biol Eng Comput.; 31: 103-110, 1993.
- 7) Jasson S, Medigue C, Maison P et. al. Instant Power Spectrum Analysis of Heart Rate Variability During Orthostatic Tilt Using a Time-/Frequency-Domain Method: Circulation 96: 3521-3526, 1997.
- 8) Bailón R, Laguna P, Mainardi L et. al. Analysis of Heart Rate Variability Using Time-Varying Frequency Bands Based on Respiratory Frequency: Proc. 29th Ann. IEEE EMBS Int. Conf., Lyon, France 6674-6677, 2007.
- 9) Boashash B. Estimating and interpreting the instantaneous frequency of a signal, I: fundamentals: Proc IEEE.; 80: 520-538, 1992.
- 10) R Development Core Team.: "R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing", Vienna, Austria. ISBN-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>, 2012.
- 11) Naifeh K. H. and Kamiya J.: The Nature Of Respiratory Changes Associated With Sleep Onset: Sleep 4: 49-59, 1981.
- 12) Douglas N. J., White D. P., Pickett C. K. et al.: Respiration during sleep in normal man: Thorax 37: 840-844, 1982.
- 13) Naifeh K. H., Severinghaus J. W. and Kamiya J.: Effect Of Aging On Sleep-Related Changes In Respiratory Variables: Sleep 10: 160-171, 1987.
- 14) Krieger J., Maglasiu N., Sforza E. et al.: Breathing During Sleep In Normal Middle-Aged Subjects: Sleep 13: 143-154, 1990.
- 15) Berne R. M. and Levy M. N. ed.: Physiology Third edition, Mosby-Year Book Inc., 1993.